

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Návrh zařízení
pro stanovení abrazivity sypkých materiálů

Design of Device
for Determination of Bulk Materials' Abrasivity

Autor diplomové práce: Bc. Michal Pelda
Vedoucí diplomové práce: Dr. Ing. Jaroslav Melecký
Ostrava 2020

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Pelda**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 20 Výrobní stroje a zařízení
Téma: **Návrh zařízení pro stanovení abrazivity sypkých materiálů**
Design of Device for Determination of Bulk Materials Abrasivity
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

V rámci řešení diplomové práce zpracujete konstrukční návrh zařízení pro stanovení abrazivity sypkých materiálů. Diplomová práce bude obsahovat:

- rešerši v oblasti navrhovaného zařízení
- variantní řešení a odůvodnění výběru optimální varianty v souladu s cíli práce
- návrh konceptu, nezbytné pevnostní výpočty a popis konstrukčního řešení
- 3D model navrženého řešení za použití vhodného CAD/CAM systému používaného na Fakultě strojní
- výkres sestavy vámi navrhovaného zařízení
- dílenské výkresy zvolených komponent (zadání bude upřesněno v průběhu řešení)

Bližší specifikace nutných technických údajů a požadavků bude upřesněna v průběhu řešení diplomové práce ve spolupráci s firmou Schenck Process s.r.o.

Seznam doporučené odborné literatury:

DEJL, Z. *Konstrukce strojů a zařízení I – Spojovací části strojů*. Ostrava: Montanex, 2007. 225s. ISBN 80-7225-018-3.

PLCHOVÁ, A., HRUDIČKOVÁ, M. *Design v konstrukci strojů, návody do cvičení: skriptum*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2005. 54 s. ISBN 80-248-0794-7.

KALÁB, K. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře, Části spojovací: skriptum*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008. 90 s. ISBN 978-80-248-1290-8.

NĚMČEK, M. *Řešené příklady z částí a mechanismů strojů: skriptum*. 2. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008. 111 s. ISBN 978-80-248-1782-8.

ČSN ISO 690 (01 0197) *Informace a dokumentace: Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*. Praha: Český normalizační institut, 2011. 40 s.

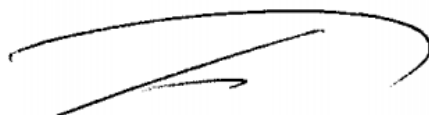
FS_SME_05_003 verze: G *Zásady pro vypracování diplomové (bakalářské) práce*.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Dr.Ing. Jaroslav Melecký**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



doc. Ing. Jiří Fries, Ph.D.
vedoucí katedry

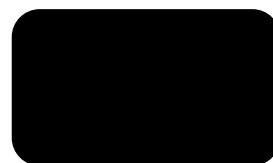


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

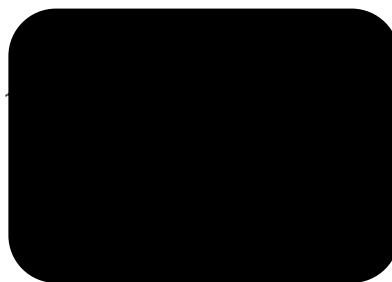
V Praze dne:18.5.2020.....



.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.



V Praze dne:18.5.2020.....

.....

Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Michal Pelda

Adresa trvalého pobytu autora: Mukařovského 2590/2 , Praha, 15500

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PELDA, M. *Návrh zařízení pro stanovení abrazivity sypkých materiálů: diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2020, 68 s. Vedoucí práce: Melecký, J.

Cílem této diplomové práce je konstrukční návrh zařízení pro stanovení abrazivity sypkých materiálů. Po úvodu práce následuje rešerše sypkých materiálů a jejich vlastností s podrobněji rozepsaným tématem opotřebení. V práci se nachází ukázka tuhých alternativních paliv, pro které je zařízení navrhováno. V dalších kapitolách je vývoj zařízení. Na začátku jsou návrhy konceptů. Následuje záznam z tisku a testování těchto vytisknutých konceptů. Dále po shrnutí závěrů z testování je náčrt prototypu a návrh prototypu. V tomto návrhu jsou návrhy zatížení vzorku, samotného vzorku, pružiny, ložiska a ložiskového domku, válcové nádoby, uchycení aku vrtačky a rukojeti. Celý návrh je poté spojen s technickou dokumentací a úvahou o ekonomickém vlivu projektu.

ANOTATION OF DIPLOMA THESIS

PELDA, M. *Design of Device for Determination of Bulk Materials' Abrasivity: diploma thesis.* Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2020, 68 s. Thesis head: Melecký, J.

The aim of this diploma thesis is a structural Design of a Device for Determination of Bulk Materials' Abrasivity. The thesis introduction is followed by a research related to the bulk materials and their properties accompanied by the topic about the wear degree being described more in details. The work is demonstrating an example of solid alternative fuels for which the device is designed. In the following chapters is the development of the device is presented. First there are concept proposals. Next are the printing and testing records of the printed drafts. After the summarization of the conclusions from the testing, there is a prototype sketch and a prototype design. In this design there are proposals for the specimen load, the specimen itself, the spring, the bearing and the bearing housing, the cylindrical container, the attachment for the cordless drill's chuck, and the handle. Finally, the whole proposal is connected with the technical documentation and the consideration about the economic impact of the project.

Seznam použitých značek

Značka	Název	Jednotka
C	Kohezivita	Pa
c	Tuhost pružiny	$\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$
CI	Index stlačitelnosti	%
d	Průměr drátu	mm
d _c	Sypná hustota	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
De	Vnější průměr	mm
Di	Vnitřní průměr	mm
D _{kr}	Vnější průměr upínacího kroužku	mm
D _{kr}	Vnější průměr upínacího kroužku na konci hřídele	mm
d _t	Konečná hustota po zatížení (Setřesná hustota)	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
D _{vz}	Vnější průměr vzorku	mm
F	Síla	N
F ₁₀	Síla působící na pružinu od zatížení 10 kg	kg
F ₂₀	Síla působící na pružinu od zatížení 20 kg	kg
F ₃₀	Síla působící na pružinu od zatížení 30 kg	kg
F _A	Axiální síla působící na pružinu	N
ffc	toková funkce materiálu	-
F _{kr,hř}	Axiální síla působící na upínací kroužek a konec hřídele	N
FL	Axiální síla působící na ložisko	N
F _n	Síla působící na pružinu	N
F _n	Maximální zatížení při L _n	N
g	Gravitační zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
h	Výška sloupce materiálu	M
L ₀	Délka bez zatížení	mm
L _{10h}	Základní životnost ložiska	h
L _n	Max. délka při zatížení	mm
m	Hmotnost	Kg
P _{max}	Maximální zatížení v uvažované násypce	Pa
S	Plocha	m ²
s _n	Deformace pružiny (úměrná síle vyvinuté na pružinu)	mm
S _n	Maximální zdvih	mm
S _{nn}	Deformace pružiny zatížené 10, 20 a 30 kg	mm
S _{vz}	Plocha vzorku	m ²
S _{vz,hř}	Plocha upínacího kroužku s koncem hřídele	m ²
U _{max}	Maximální kusovitost (velikost zrna)	mm
α	Sypný úhel	°
θ _d	Dynamický sypný úhel	°
θ _s	Statický sypný úhel	°
θ _s	Odtokový sypný úhel	°
π	Ludolfovo číslo	-
ρ	Hustota sypkého materiálu	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
σ _c	Prostá mez kluzu	Pa
σ ₁	Hlavní normálové napětí	Pa
φ _i	Vnitřní tření	°
φ _e	Efektivní úhel tření	°
ω ₁	Úhlová rychlost	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$

Obsah

1	ÚVOD [1]	1
1.1	CÍLE PRÁCE	1
2	REŠERŠE	2
2.1	OBLAST SYPKÝCH HMOT	2
2.2	SYPKÉ MATERIÁLY	3
2.3	VLASTNOSTI SYPKÝCH MATERIÁLŮ	3
2.3.1	Vlhkost	3
2.3.2	Zrnitost	3
2.3.3	Sypný úhel θ	3
2.3.4	Hustota sypkého materiálu	4
2.3.5	Kompresivita	5
2.3.6	Kohezivita materiálu	6
2.4	OPOTŘEBENÍ	7
2.4.1	Testování abrazivity sypkých hmot	7
2.4.2	Zkoušky abrazivity	7
2.4.3	ASTM normy	7
2.4.4	Zkoušky s abrazivem o známé abrazivitě	8
2.4.5	Testování s abrazivem o neznámé abrazivitě	10
3	TUHÁ ALTERNATIVNÍ PALIVA	12
3.1	DŘEVNÍ ŠTĚPKA	12
3.2	DŘEVĚNÉ PELETY	12
3.3	RDF	12
3.4	KALY Z ČISTÍREN ODPADNÍCH VOD	13
3.5	VELIKOST, TVAR A SLOŽENÍ Z PRAXE	14
4	NÁVRH KONCEPTU	15
4.1	KRITÉRIA KONCEPTŮ	15
4.1.1	Měření sypného úhlu	15
4.1.2	Měření hustoty sypkého materiálu	15
4.1.3	Měření kompresivity	15
4.1.4	Měření smykové síly	15
4.1.5	Testování abrazivity	15
4.1.6	Materiál vzorku	16
4.2	ÚVAHA O NÁVRHU PROTOTYPU	16
4.3	NÁVRHY KONCEPTŮ	16
4.3.1	Materiál vzorku ovlivněného abrazí	16
4.3.2	Vizuální vyhodnocení	17
4.3.3	Stupnice a databáze výsledků	17
4.3.4	Testování abraze pomocí lopatek	17
4.3.5	Testování abraze pomocí plastových krychliček	17
4.3.6	Testování abraze pomocí posuvného vzorku	17
4.3.7	Testování abraze pomocí rotujícího víka	18
4.4	PRINCIP MĚŘENÍ ABRAZIVITY A DALŠÍ MOŽNOSTI	18
4.4.1	Testování pomocí válce s lopatkami	18
4.4.2	Testování pomocí bubnu s plastovými krychličkami	19
4.4.3	Testování pomocí válce se žiletkami	19
4.4.4	Testování pomocí nádoby s posuvným vzorkem	19
4.4.5	Testování pomocí válce s rotujícím víkem	20

5	PLASTOVÝ TISK NAVRŽENÝCH KONCEPTŮ.....	22
5.1	3D TISK.....	22
5.1.1	3D tiskárna - Ultimaker 3.....	22
5.2	KVALITA TISKU.....	22
5.3	PRVNÍ VRSTVA.....	23
5.4	VÝPLŇ VÝTISKŮ.....	23
5.4.1	Ukázky z tisku hřídele.....	24
5.5	POUŽITÝ MATERIÁL.....	24
5.6	TEPLOTA TISKU.....	25
5.7	RYCHLOST TISKU.....	25
5.8	CHLAZENÍ.....	25
5.9	TEPLOTA PODLOŽKY.....	25
5.10	PODPORY.....	25
5.11	NEJČASTĚJŠÍ PARAMETRY TISKU NAVRHOVANÝCH KONCEPTŮ.....	25
5.12	VYTISKNUTÉ KONCEPTY.....	26
6	TESTOVÁNÍ VYTISKNUTÝCH KONCEPTŮ.....	28
6.1	PRVNÍ NÁVRH - VÁLEC S LOPATKAMA.....	28
6.2	DRUHÝ NÁVRH - VÁLEC SE ŽILETKAMA.....	29
6.3	TŘETÍ NÁVRH - NÁDOBA S POSUVNÝM VZORKEM.....	30
6.3.1	Fotky testovaných vzorků.....	30
6.4	ZÁVĚR TESTOVÁNÍ KONCEPTŮ.....	32
7	NÁČRT PROTOTYPU.....	33
8	NÁVRH PROTOTYPU.....	36
8.1	FUNKCE ZAŘÍZENÍ.....	36
8.2	NÁVRH ZATÍŽENÍ VZORKU.....	37
8.2.1	Návrh velikosti zatížení vzorku.....	38
8.2.2	Výběr pružiny.....	39
8.2.3	Kontrola pružiny.....	39
8.2.4	Minimální zatížení pružiny.....	40
8.2.5	Stupnice zatížení.....	40
8.3	VZOREK.....	41
8.3.1	Materiál.....	41
8.3.2	Přenos krouticího momentu.....	41
8.3.3	Uložení vzorku.....	41
8.3.4	Statická analýza vzorku s opěrnou destičkou.....	41
8.3.5	Výsledek statické analýzy.....	42
8.4	NÁVRH LOŽISKA.....	43
8.4.1	Kontrola ložiska v programu MitCalc.....	44
8.5	NÁVRH LOŽISKOVÉHO DOMKU.....	45
8.5.1	Výsledek statické analýzy.....	45
8.6	NÁVRH VÁLCOVÉ NÁDOBY.....	47
8.6.1	Kontrola dna válcové nádoby.....	48
8.6.2	Výsledek statické analýzy.....	48
8.7	NÁVRH UCHYCENÍ PRO AKU VRTAČKU.....	49
8.8	NÁVRH RUKOJETI.....	49
8.9	MĚŘENÍ KOMPRESIVITY.....	49
9	TECHNICKÁ DOKUMENTACE.....	50
9.1	PRÁVNÍ POVINNOSTI.....	50
9.2	BEZPEČNOSTNÍ NÁLEPKY.....	50
9.3	NÁVOD K POUŽITÍ.....	50

9.4	ŠTÍTEK ZAŘÍZENÍ S CE OZNAČENÍM.....	50
9.5	ANALÝZA RIZIK	51
10	NÁVRH TESTOVÁNÍ	52
10.1	PODMÍNKY POUŽITÍ ZAŘÍZENÍ.....	52
10.2	KÓD VZORKU	52
10.3	POSTUP ZKOUŠKY	52
10.4	VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY	52
11	EKONOMICKÝ VLIV PROJEKTU	53
12	ZÁVĚR.....	54
13	LITERATURA.....	55
14	SEZNAM PŘÍLOH	58

1 Úvod [1]

Technika se stále vyvíjí a týká se to mimo jiné i absolutních i měrných výkonů strojních zařízení. Zvětšují se otáčky, provozní rychlosti, tlaky, teploty atd. Se stále většími výkony rostou i nároky na snížení vlivu tření a opotřebení strojních dílů přicházejících do kontaktu se sypkými hmotami. V této práci jsem se zabýval návrhem zařízení pro testování abrazivity sypkých hmot. Výsledek by měl být prvním krokem k lepší predikci životnosti strojních dílů jako je např. žlab a dno dopravníků. Rozhodli jsme se s Firma Schenck Process s.r.o. společně vyvinout zařízení na testování abrazivity sypkých hmot.

V diplomové práci jsem provedl rešerši týkající se zadaného tématu. Následuje vývojová etapa - návrh konceptů zařízení, výroba 3D tiskem navržených konceptů, testování vytisknutých konceptů se zhodnocením o tom, kterým směrem by se měl další vývoj vydat. Po ukázce náčrtů prototypu následuje kapitola „Návrh prototypu s výpočty potřebných parametrů“, nezbytnou kontrolou vybraných dílů, vč. ukázky konstrukce prototypu. Potom následuje kapitola s popisem procesu návrhu prototypu z právní stránky. V předposlední kapitole jsem uvedl vyjádření vedoucího vývojového oddělení k ekonomickému vlivu projektu. Na konci pak závěr v rozsahu jedné stránky, kterým jsem shrnul svoji práci.

1.1 Cíle práce

1. Provedte rešerši v oblasti navrhovaného zařízení.
2. Navrhněte variantní řešení a zdůvodněte výběr řešené varianty v souladu s cíli práce.
3. Navrhněte koncept, provedte nezbytné pevnostní výpočty a popište konstrukční řešení.
4. Pro vytvoření 3D modelu vašeho řešení zvolte CAD/CAM systém používaný na Fakultě strojní.
5. Z vámi navrhovaného 3D sestavy vytvořte sestavný výkres.
6. Nakreslete zvolené dílenské výkresy ze sestavy (zadání bude upřesněno v průběhu řešení).
7. Diplomová práce vyhotovená v souladu s požadavky a předpisy FS bude obsahovat úvodní rešerši, návrh konceptu, nezbytné pevnostní výpočty a popis konstrukčního řešení, rozsah práce je stanoven na webových stránkách <http://www.340.vsb.cz/>.
8. Návrh bude respektovat technické parametry na základě spolupráce se zadávací firmou Schenck Process s.r.o.

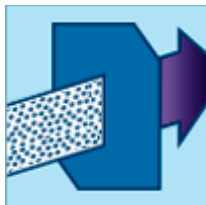
2 Rešerše

2.1 Oblast sypkých hmot [2]

Do oblasti sypkých hmot patří celá řada technologických procesů. Níže je jejich základní přehled:



Šnekové a řetězové
dopravníky, elevátory



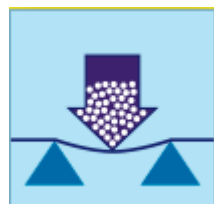
Filtrace vzduchu



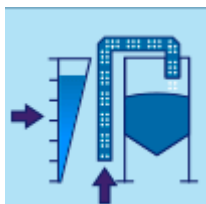
Uzavírání toku
sykých materiálů



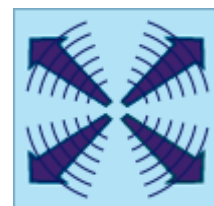
Vyprazdňování



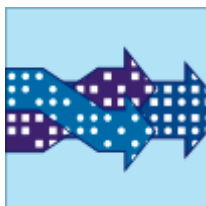
Odebírání a dávkování
sykých materiálů



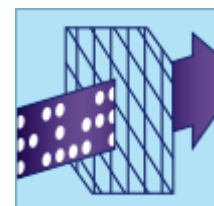
Pneumatická doprava
a síla



Vibrační materiály –
podpora toku materiálu



Míchání, kondicionování,
drcení a granulování



Separátory a zařízení
do čistíren



Zařízení splňující
ATEX

Příklady odvětví, ve kterých se zařízení na dopravu sypkých hmot uplatňují:

- Balení potravin
- Čištění a sušení kalů
- Čistírny odpadních vod
- Doly a kamenolomy (drcení, mletí)
- Extrahování olejů
- Filtrace prachu
- Keramický průmysl
- Míchání maltových směsí
- Mlýn na mouku
- Pneumatická doprava
- Jatka
- Výroba barev, ředidel a lepidel
- Výroba cementu, sádky a vápna
- Výroba pracích prášků
- Výroba umělých hmot
- Zpracování odpadů z papírny
- Zpracování pryže
- Zpracování slévárenského písku
- Zpracování alternativních paliv
- atd.

2.2 Sypké materiály

Manipulace se sypkými a zrnitými materiály je pro průmysl velmi důležitá. Pouze v chemickém průmyslu je polovina produktů a nejméně tři čtvrtiny surovin ve formě prášku a granulovaných pevných látek. Během výroby, manipulace a přepravy se sypké materiály opotřebovávají. Jsou totiž vystavovány nárazovým silám, tlakovým silám a abrazivním silám. Tlakové síly mají tendenci se vyskytovat v násypkách, dopravních systémech, silech a v kamionu nebo ve vagónech, kde jsou částice stlačovány vlastní hmotností. Tlakové síly mohou způsobit zdobňování částic, což někdy vede k uvolnění materiálu uvnitř částic sypkého materiálu. K charakterizaci a testování chování sypkého prášku je k dispozici celá řada různých metodik výzkumu. Pevnost pro radiální a axiální drcení pelet a tablet, technika robotického kompresního testu pro menší částice a granule, zkoušení smyku podle Jenike, Peschl nebo Schulze, zkouška kompaktní pevnosti po jednoosém stlačení, práškové charakteristiky pomocí Hosokawa pro tekutost a zaplavitelnost podle Carrových indexů, odolnosti proti otěru a výzkumu prašnosti metodami kontinuálního pádu a rotačního bubnu podle Heubach a EN 15051. Nicméně testovací zařízení, které by vyhovovalo firmě Schenck Process s.r.o. na trhu není.

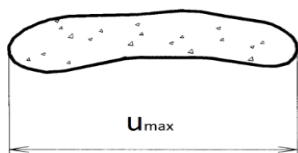
2.3 Vlastnosti sypkých materiálů [3]

Za hlavní ukazatele vlastností sypkých materiálů se považují vlhkost, zrnitost, sypný úhel, hustota, kompresivita, úhel vnitřního a vnějšího tření, kohezivita a z ní vycházející toková funkce, abrazivita a složení sypkého materiálu.

2.3.1 Vlhkost [4]

Vlhkost je vyjádřena obsahem vody ve vzorku v procentech jeho hmotnosti. Obsah vody se během dopravy, manipulace a skladování sypkých hmot neustále mění. Sypkému materiálu schopnému zadržovat určitý obsah vody říkáme vlhký, jedná se vlastně o materiál, ve kterém voda ulpívá na zrnech. Vlhkost a nasákavost (schopnost přijmout vodu) je důležitá k posouzení náchylnosti k nalepování a namrzání sypké hmoty na dopravních systémech.

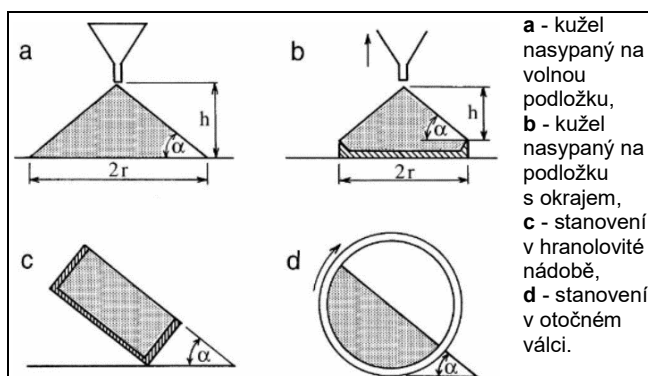
2.3.2 Zrnitost [4]



Obr. 1: Max. rozměr zrna u_{\max} [4]

Zrnitost je složení sypké hmoty podle velikosti zrna vyjádřené buď procentuálním obsahem zvolených tříd zrnitosti, nebo křivkou zrnitosti (frekvenční a součtová křivka). Maximální kusovitost (velikost zrna) u_{\max} [mm] je jmenovitá velikost strany čtvercového síta, kterým propadne 95 % hmotnosti zrniva.

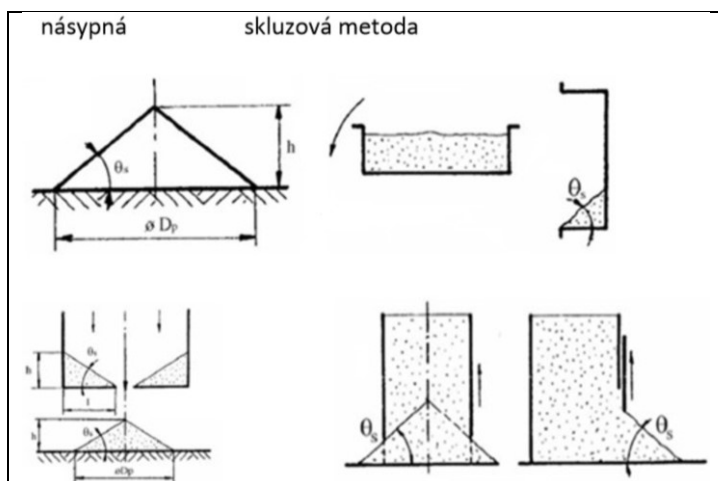
2.3.3 Sypný úhel θ [5]



Obr. 2: Typy stanovení sypného úhlu [5]

Sypný úhel α [°] označuje úhel kužele přirozeně vytvořený vrstvením materiálu, např. při sypání z výpadu násypky nebo dopravních zařízení. Obecně platí, že čím větší úhel, tím horší tok. Existuje celá řada zkušebních metod měření a ty můžeme rozdělit na měření sypného úhlu statického, odtokového nebo dynamického. Hodnotu sypkého úhlu ovlivňují vazby mezi částicemi a kohezivita materiálu, k čemuž došlo empirickým pozorováním. Z toho vychází, že čím má materiál menší sypný úhel, tím se vyznačuje i lepším tokem.

Statický sypný úhel [5]



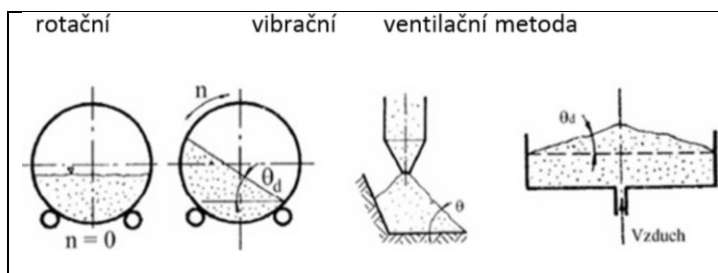
Obr. 3: Měřitelné struktury statického sypného úhlu [5]

Statický sypný úhel θ_s [°] svírá tečnu svahu nahromaděného kužele sypkého materiálu k rovině podložky, na kterou byl materiál nasypán.

Metody jak vytvořit měřitelnou strukturu sypkého materiálu se dají rozdělit do dvou skupin a to násypná a skluzová metoda, viz obrázek 3.

Alternativou k sypnému úhlu je odtokový sypný úhel. Měřený v násypce, viz obrázek 3, úhel θ_s [°] v násypce vlevo dole.

Dynamický sypný úhel [5]



Obr. 4: Měřitelné struktury dynamického sypného úhlu [5]

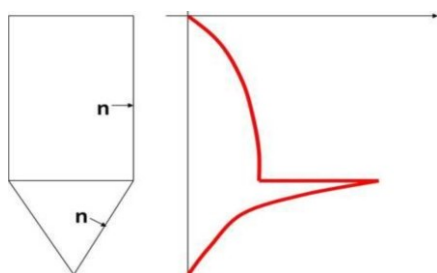
Dynamický sypný úhel θ_d [°], se měří stejně jako u statického sypného úhlu, jen se měří buď pomocí rotačního bubnu, chvíli vibrující podložky nebo nádobou s profukováním vzduchu, viz obrázek 4.

2.3.4 Hustota sypkého materiálu [5]

Hustota sypkého materiálu ρ [kg/m³], závisí na vlastnostech částic (velikost, distribuce, tvar a struktura), ale především na jejich uspořádání, včetně prázdného objemu mezi částicemi. Hustotu sypkých materiálů můžeme rozdělit na sypnou hustotu a setřesnou hustotu. Obě tyto hustoty mají spojitost s procesy se sypkými materiály ve výrobě.

Sypná hustota [6]

Sypná hustota d_c [kg/m³] známa i jako sypná hmotnost, někdy také jen jako hustota, se zjišťuje různými metodami, podle předpisů. Jelikož sypná hustota není tabulkovou hodnotou, je potřeba provádět její měření. Tato hodnota materiálu se získává mnohonásobným měřením hmotnosti např. v kbelíku o definovaném objemu. Jde o to, že každý měřený vzorek může mít rozdílnou hmotnost. Zvaží se například dvacet vzorků materiálu o definovaném objemu a sypná hustota se průměrováním dopočítá. Existuje více hodnot sypné hustoty. Hodnota se odvíjí od rozsahu tlaku působící na materiál.



Obr. 5: Tlak na stěnu násypky [6]

Sypná hustota materiálu přímo ovlivňuje tlaky působící na stěny násypky. **Čím je lépe určen vztah mezi sypnou hustotou a tlakem, tím jsou přesněji určené síly působící v násypce.** Pevné částice proudící v hmotnostním průtoku vykazují rozložení tlaku podobné tomu, které je znázorněno na obrázku 5. V oblasti konstantního průřezu válcového úseku se tlak pevných látek zvyšuje. Na přechodu mezi válcovou částí a násypkou, kde materiál přechází do zmenšujícího se průřezu

násypky, materiál výrazně zhoustne. V této části násypky dochází k vysokému špičkovému tlaku, který rychle klesá, pohybem materiálu k výpadu násypky. Znalost rozsahu sypné hustoty materiálu umožňuje předpovídat zatížení materiálem, které bude aplikováno na libovolné dávkovací zařízení nebo uzávěry připojené k výstupu násypky.

Setřesná hustota [6]

Setřesná hustota d_t [kg/m³] je hustota sypkého materiálu po sklepní odměrného válce. Zahrnuje i volný prostor mezi částicemi, který podle typu sypkého materiálu může být oproti volnému prostoru v čase nasypání menší. Menší částice rovněž vyplňují prostory mezi většími částicemi.

2.3.5 Kompresivita [6, 7]

Kompresivita sypkého materiálu popisuje stlačitelnost jako měřítko relativní změny objemu pevné látky, jako odezvu na změnu tlaku. Jinak řečeno se jedná o poměr sypné hustoty vůči tlaku. Popisuje se **indexem stlačitelnosti CI** [%] udávajícím míru interakcí mezi částicemi a počítá se podle rovnice níže (1).

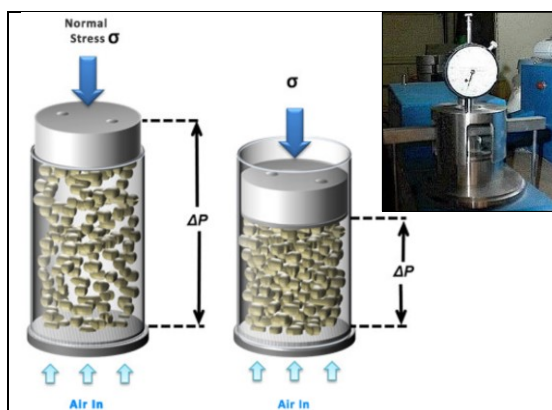
$$CI = 100 \frac{d_t - d_c}{d_t} = [\%] \quad (1)$$

d_c - Sypná hustota [kg/m³]

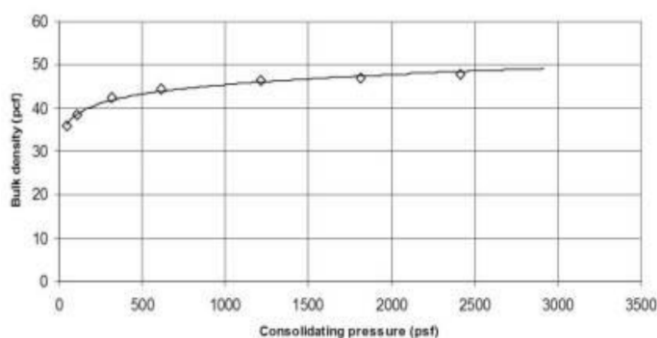
d_t - Konečná hustota po zatížení (setřesná hustota) [kg/m³]

Kompresivita je ovlivněna vlhkostí materiálu, velikostí částic, pružností a teplotou. Test kompresivity je jednoduchá zkouška. Informace shromážděné testováním se používají například **ke zjištění průtokových vlastností materiálu**. Materiál v násypce nebo v jiných místech skladování v praxi podléhá tlakům a zatížením z vlastní hmotnosti nahromaděného materiálu. Tyto tlaky a zatížení se ještě zvyšují vlivem průtoku nebo manipulace s materiálem. Soudržnější materiály mají interakce mezi částicemi významnější a jsou pozorovány větší rozdíly mezi hodnotami sypné a setřesné hustoty. Čím větší je rozdíl mezi hustotami, tím je materiál více stlačitelný.

Na obrázku 6 lze vidět zařízení na měření kompresivity. Obsahuje komoru o průměru 63,5 mm a výšce 19 mm, která je volně naplněná vzorkem materiálu. Hlavní části tohoto zařízení jsou kryt, závěsné závaží a budík, který se používá k měření vzdálenosti, o kterou se materiál v nádobě zmenšil nebo přímo k měření kompresivity. Zaznamenávají se výsledky měření pro každý typ testovacích závěsných závaží při stejné výchozí výšce materiálu. Měření umožňuje vypočítat sypnou hustotu při různých tlacích, které byly vyvinuty působením závaží. Tyto hodnoty se pak dají vyjádřit v grafu s funkcí sypné hustoty vůči tlakům, ukázka na obrázku 7. Přesné určení stlačitelnosti sypkého materiálu poskytuje důležité informace, které mohou významně ovlivnit kritéria návrhu strojních zařízení.



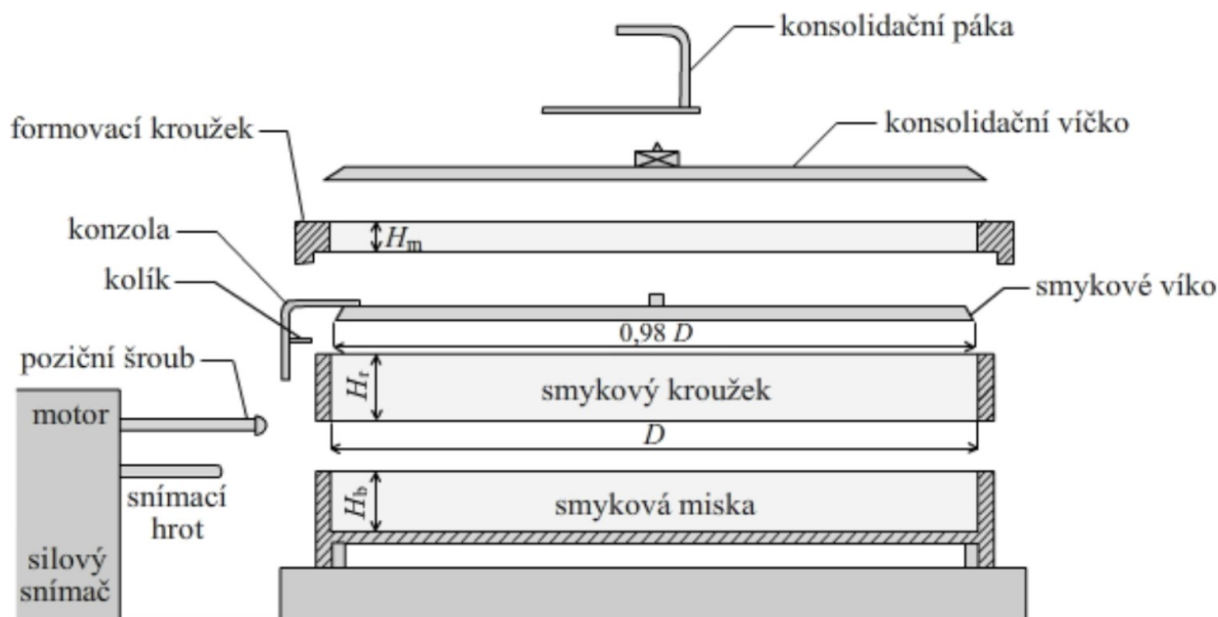
Obr. 6: Testovací zařízení kompresivity [6, 7]



Obr. 7: Závislost mezi sypnou hustotou a tlakem [6]

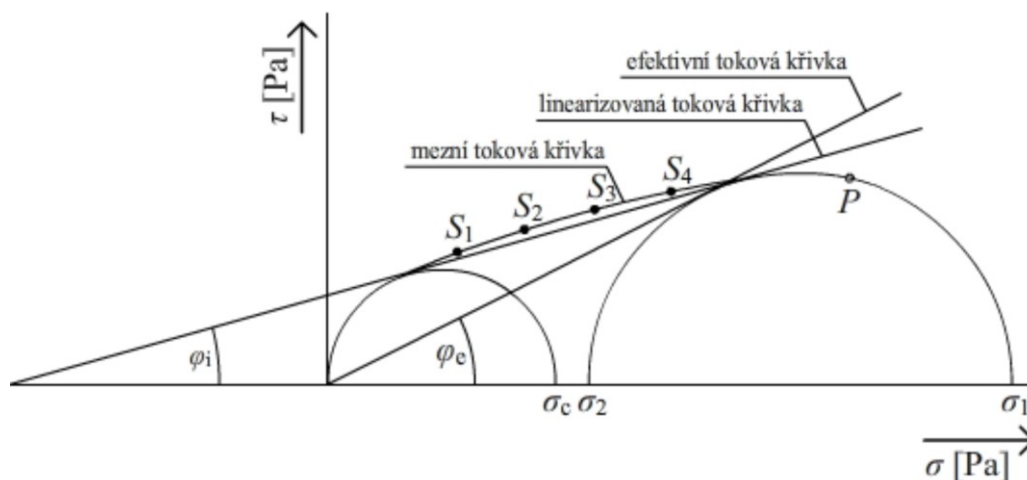
2.3.6 Kohezivita materiálu [6, 8]

Kohezivita C [Pa] je jinak řečeno soudržnost nebo také ulpínavost materiálu na funkčním povrchu, např. na funkčním povrchu dopravních zařízení jako je žlab, násypka, skluz materiálu apod. Nekohezivní materiály mají buď nulovou nebo zápornou hodnotu smykového napětí, kdežto kohezivní materiály mají kladnou hodnotu smykového napětí. Kohezivní vlastnosti souvisí hlavně se sypanou hustotou a měří se pomocí testovacího zařízení, jako je např. Jenikův smykový stroj nebo na stejném principu pracující smykový přístroj s lineární nebo prstencovou smykovou celou. Tyto zařízení se používají k určení tokové funkce materiálu „ ff_c “. Na obrázku 8 je ukázka zařízení pro měření smykové síly při experimentu se sypaným materiálem.



Obr. 8: Schéma Jenikého smykového stroje [8]

Pomocí měření na zařízeních jako je Jenikého smykový stroj lze naměřit hodnoty smykové síly. Tyto hodnoty po zpracování a následné analýze pomocí Mohrových kružnic v σ - τ diagramu umožní zjištění: úhlu vnitřního tření φ_i [°], efektivního úhlu tření φ_e [°], kohezivity C [Pa], prosté meze kluzu σ_c [Pa], hlavního normálového napětí σ_1 [Pa] a tokové funkce ff_c [-]. Na obrázku 9 je ukázka σ - τ diagramu se stanovenými vlastnostmi sypaného materiálu dříve zmíněnými.



Obr. 9: Mohrovy kružnice, úhly vnitřního tření a mezni toková křivka [8]

2.4 Opotřebení [9]

Při opotřebení dochází k nežádoucí trvalé změně povrchu (rozměrů), která je způsobena vzájemným působením funkčních povrchů nebo působením okolního média na funkční povrch součástí. Měřítkem opotřebení je zejména úbytek materiálu, ale taky změna jakosti, případně tvaru funkčního povrchu. Při opotřebení dochází převážně ke zhoršování funkce součástí a k předčasnému vyřazení. Opotřebení, představuje v globálním měřítku obrovské hospodářské ztráty. Tribologickým procesům, které nepředstavují bezprostřední riziko havárie zařízení, není většinou věnována taková pozornost jako procesům únavy nebo tečení. Průzkumy ukazují, že opotřebení způsobuje až 80% všech poruch strojních zařízení. K předejití výpadku nebo havárie zařízení je zavedené buď periodické měření stavu opotřebení součástí, nebo se preventivně vyměňují po čase stanoveném praxí, výpočtem nebo experimentem. Tento čas se obvykle udává v provozních hodinách zařízení.

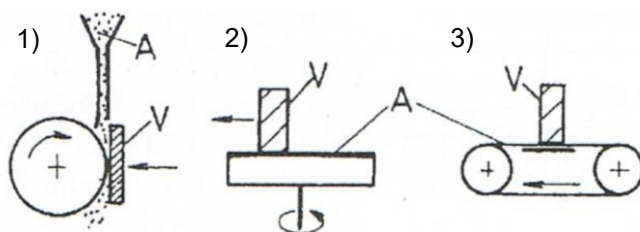
2.4.1 Testování abrazivity sypkých hmot [10, 11]

Testování abrazivity se používá buď ke zjištění oděruodolnosti zkoumaných materiálů, jako jsou kovy, komposity, keramika, a povlaků, nebo schopností materiálu obrušovat povrchy. Testováním se produkují data, které mají být reprodukovatelná. Pro reprodukovatelnost zkoušek je nutné, aby se vzorky, na kterých se abrazivnost sypkých materiálů zkouší, zkoušeli pokaždé na stejném vzorku a za použití stejných okolních podmínek, jako jsou působící tlaky, doba opotřebovávání apod.

V oblasti testování opotřebení se zkoušky dělí hlavně na vysoko zátěžové a nízko zátěžové. Zkoušky vysoko zátěžové se vyznačují poškozením abraziva, použitým zatížením při zkoušce. Naopak nízko zátěžové zkoušky abrazivu nezpůsobují patrná poškození. Nikde není předepsáno, jaký druh opotřebení abraziva by při zkoušce měl být zvolen.

2.4.2 Zkoušky abrazivity [9]

Zkoušky abrazivního opotřebení lze rozdělit podle různých kritérií. Zkoušky s volným a vázaným abrazivem a zkoušky s abrazivem o známé nebo neznámé abrazivitě sypkého materiálu. Na obrázku 10, jsou zobrazeny tři příklady zkoušek (Písm. A označuje abrazivum a písm. V označuje vzorek).



Obr. 10: Schematický princip tří zkoušek abrazivních zkoušek [9]

U zkoušek s volným abrazivem se mohou abrazivní částice sypat mezi vzorek a rotující pryžový kotouč, jako např. č. 1 na obrázku 10. Další možností je zkoušet abrazivitu vložení abraziva do rotujícího bubnu či nádoby, ve kterém abrazivum odírá, rotující buben nebo nehybně uložený vzorek materiálu, jako např. č. 2 na obrázku 10. U zkoušek s vázaným abrazivem se abrazivum připojí prostřednictvím pojiva k povrchu, čímž se z něho stane brusný povrch (testování na horizontální desce). Takto vzniklý brusný povrch, který je v kontaktu se vzorkem, svým pohybem způsobuje opotřebení vzorku jako např. č. 3 na obrázku 10.

2.4.3 ASTM normy [12]

ASTM - American Society for Testing and Materials je organizace, která vyvíjí a publikuje dobrovolné konsensuální technické normy pro širokou škálu materiálů, výrobků, systémů a služeb. Jedna se o obsáhlý seznam norem na měření různých veličin a jevů. ASTM výbor se zavázal dodržovat zásady Světové obchodní organizace pro vývoj těchto mezinárodních norem.

2.4.4 Zkoušky s abrazivem o známé abrazivitě [11]

2.4.4.1 Standardní zkoušky

Příkladem zkoušky s abrazivem o známé abrazivitě je standardní zkušební metoda pro měření oděru s použitím zařízení na suchý písek / pryžové kolo (**DSRW**), popsaná normou **ASTM G65**. Je obecně charakterizována vnášením abrazivního média, mezi rotující kolo opatřené po jeho obvodu pryžovým materiálem a vzorek testovaného materiálu, na který zároveň působí síla libovolné velikosti. Tato metoda byla rozšířena o tzv. zkoušku Dry Sand / Steel Wheel Test (**DSSW**) simulující „high-stress“ podmínky měření popsaná normou **ASTM B611**, která simuluje vysoko zátěžové podmínky měření. Pozornost se často věnuje rozdílu mezi DSRW a DSSW. Především je hodnocený rozdíl ve výsledcích účinku abraziva. Je zřejmé, že v DSRW se abrazivní účinky mírní díky gumovému kolu. U ocelového kola se naopak projevuje prudký nárůst opotřebení ocelového kola společně s abrazivem. Ne však u každého materiálu se tento rozdíl projevuje. Tyto zkoušky odpovídají simulaci dějů opotřebení, které se vyskytují například v ropném, zemědělském a důlním průmyslu u ložiskových čepů, ocelových lan, kde jsou strojní součásti pomalu opotřebovávány třecím a valivým vlivem třecích částic ve zpracovávaném materiálu. Obě tyto zkoušky spadají pod normu ISO28080:2011.

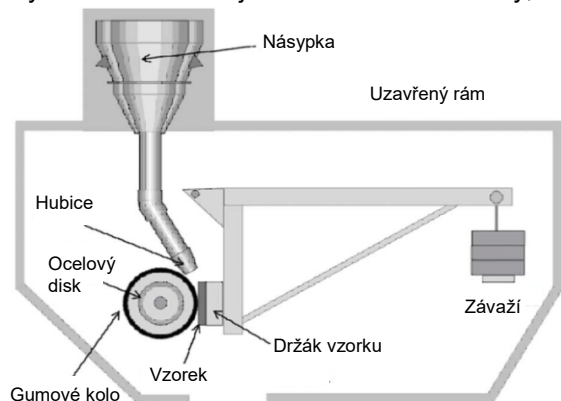
Dalším příkladem standardní zkoušky je metoda podle normy **ASTM G195** pro provádění zkoušek opotřebení pomocí rotačního brusného kotouče. Testovaný vzorek je uchycený na rotující platformu a na zkoušený vzorek jsou ze dvou stran přitlačovány dva brusné kotouče. Opotřebení je realizováno na styku platformy a ploch obou brusných kotoučů.

2.4.4.2 ASTM G65 Dry Sand / Rubber Wheel test (DSRW) [13]

DSRW je standardní zkušební metoda pro měření oděru s použitím zařízení na suchý písek a pryžové kolo. Je vhodná na měření materiálů jako jsou keramika, oděruodolné povlaky, kompozitní materiály, sklo, kovy a plasty. Při testování se používá abrazivum se známou velikostí částic a složením. Provádí se kontrolovaný průtok mezi zkušebním vzorkem a otočným gumovým kolem. Zkušební prvek může mít libovolný materiál nebo povlak.

Průběh zkoušky

Prvním krokem zkoušky je očištění vzorku a následné změření jeho hmotnosti s přesností na 0,001 g. Druhým krokem je uložení a zajištění vzorku do držáku vzorku. Poté se přidá zvolené závaží na zajištěné otočné rameno. V předepsaném poměru se spustí z hubice rovnoměrná clona písku. Poté se spustí pohon otočného gumového kola a nastaví se počítadlo otáček nebo stopky. Následně se opatrně spustí otočné rameno se závažím, vyvíjející tlakovou sílu vzorku na gumové kolo, přičemž mezi nimi proudí písek. Otáčení kola při konstantní rychlosti ve směru abrazivního toku odírá zkušební povrch. Rozdíl v hmotnosti před a po zkoušce určuje míru opotřebení a tím i odolnost proti oděru. Výsledek se získá zjištěním hmotností ztráty, která je rovna rozdílu hmotnosti vzorku před a po zkoušce.



Obr. 11: Zařízení na suchý písek a pryžové kolo [14]



Obr. 12: Zařízení pro DSRW [15]

2.4.4.3 ASTM G195 Taberův test [11, 16, 17]

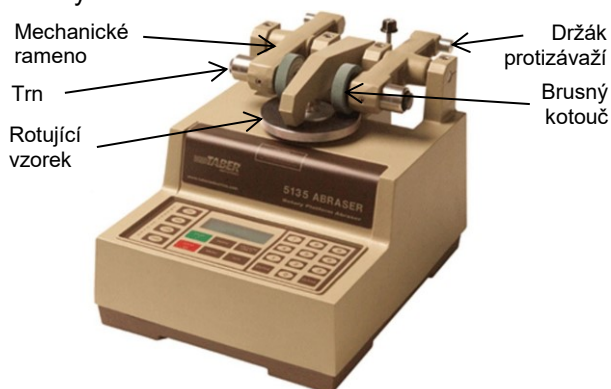
Taberův test se využívá při testování odolnosti povrchů proti otěru, oděru, obroušení, poškrábání a erozi širokého spektra pevných materiálů. Touto metodou se testují povlaky, obklady, kartony, kůže, koberce, plasty a textilie. Výhoda je univerzálnost, jednoduchost a prostorová nenáročnost měřicího zařízení. Na obrázku 13 je ukázka zařízení, na kterém se provádí Taberův test. Testování probíhá na vzorku o max. tloušťce do 13mm.

Průběh zkoušky

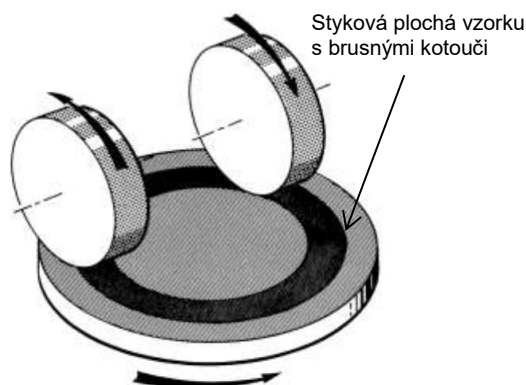
Vzorek se pevně uchytlí na kulatou nebo čtvercovou platformu, která se otáčí kolem vertikální osy stálou obvodovou rychlostí. Na vzorek jsou ze dvou stran přitlačovány dva brusné kotouče, které jsou unášeny kolem své horizontální osy v tečném směru pohybu rotujícího vzorku, viz obrázek 14.

Opotřebení je realizováno na styku platformy a plochách obou brusných kotoučů a projevuje se na vzorku úplnou kružnicí. Oba kotouče jsou připevněny k ramenům, která jsou vůči sobě mechanicky nezávislá. Z důvodu motnáže a kontroly opotřebení vzorku jsou tyto ramena výklopná. Základní zatížení na platformu je 250 g. Na těchto ramenech se nachází trny, na které je možné přidat závaží pro zvýšení napětí na styčné plochy. Podle požadavků lze standardně přidat závaží 500 a 1000 g. Soustředné umístění trnů brusných kotoučů zajišťuje rovnoměrné rozložení přidaného závaží na obě styčné plochy. Na opačných stranách ramen jsou umístěny držáky pro nasazení protizávaží, kterými lze snížit zatížení. Protizávaží mají hmotnosti 50, 125 a 175 g.

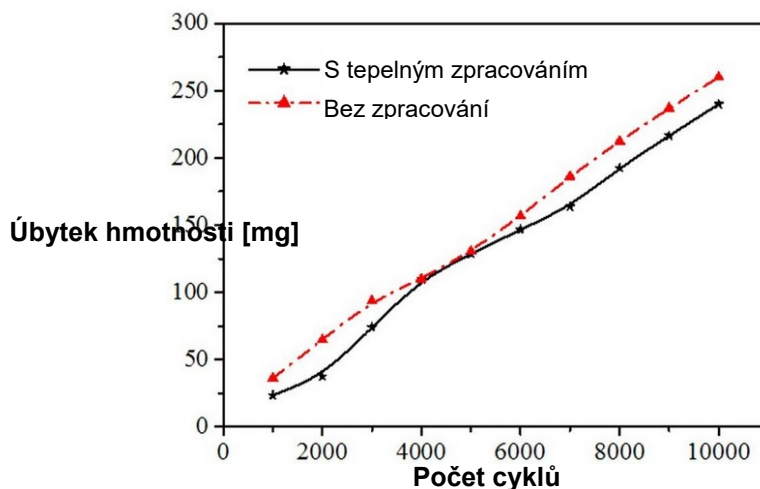
Na obrázku 15 je zobrazený graf závislosti úbytku hmotnosti na počtu cyklů pro dva otestované vzorky Taberovým testem. Jako vzorky byly použity niklovo-borové povlaky na hliníku s tepelným zpracováním i bez zpracování. Z grafu lze jednoznačně rozlišit rozdíl v úbytku materiálu ze vzorků znázorněný dvěma křivkami.



Obr. 13: Taber Abraser [17]



Obr. 14: Princip Taberova testu [16]



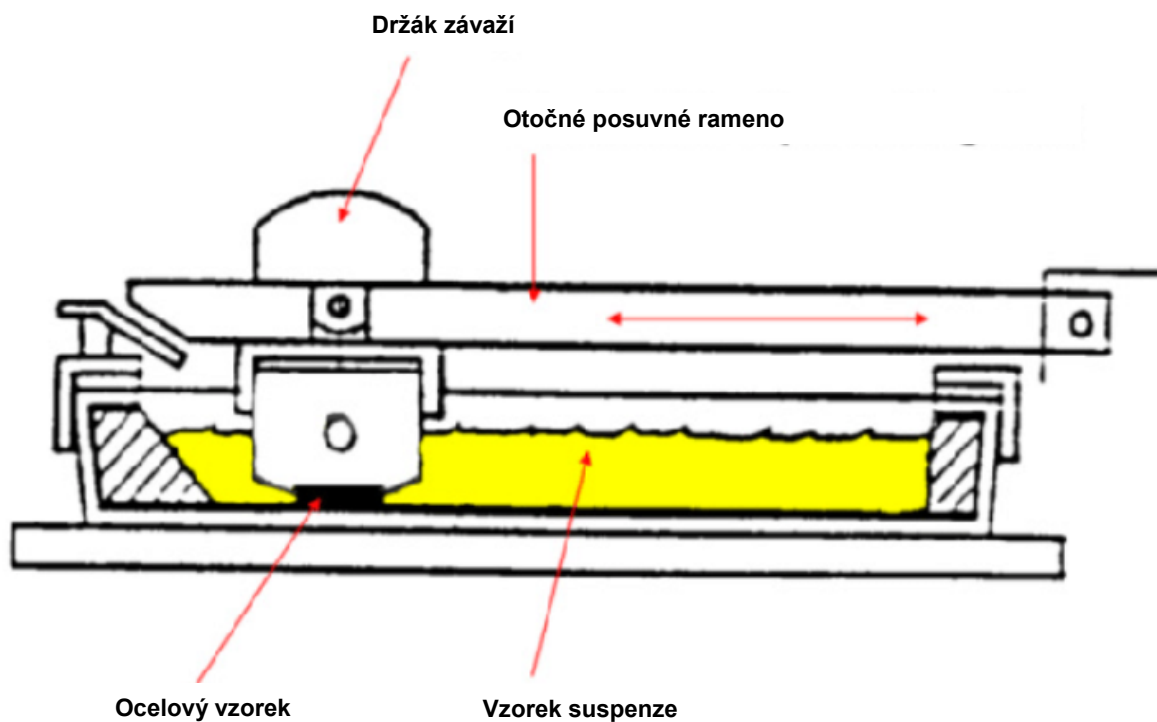
Obr. 15: Úbytek hmotnosti během Taberova testu [18]

2.4.5 Testování s abrazivem o neznáme abrazivitě

2.4.5.1 Standardní zkouška ASTM G75 [19, 20]

Jednou ze standardních zkušebních metod, je metoda ASTM G75, sloužící pro stanovení abrazivity kalu rozpuštěných v suspenzi (Millerovo číslo), tak i vlivem kalů na zkušební materiál (číslo SAR). Provádí se na zařízení zvaném v anglickém jazyce jako *Miller Number Slurry Abrasivity Test Machine*, ukázané na obrázku 16.

Touto zkouškou lze získat data sloužící k výpočtu buď čísla vztahujícího se k míře ztráty hmotnosti duplicitních bloků ze slitiny chromu a oceli, které jsou po určitou dobu v požadované suspenzi (**Millerovo číslo**) nebo k vypočítání čísla související s mírou ztráty hmotnosti (přeměněného na ztrátu objemu) duplicitních vzorků standardních tvarů z jakéhokoli materiálu, který je předmětem zájmu (**číslo SAR**). Tato zkouška se může provádět s libovolnými kaly kašovitě konzistence. Se zvyšující se hodnotou obou čísel roste i míra opotřebení. Velkou výhodou této metody je bezpochyby pestrá kombinace tuhé látky s kapalinou. Obě čísla se často používají především pro ověření vhodnosti materiálu čerpadel a potrubí, které se v praxi používají pro konkrétní druh suspenze.

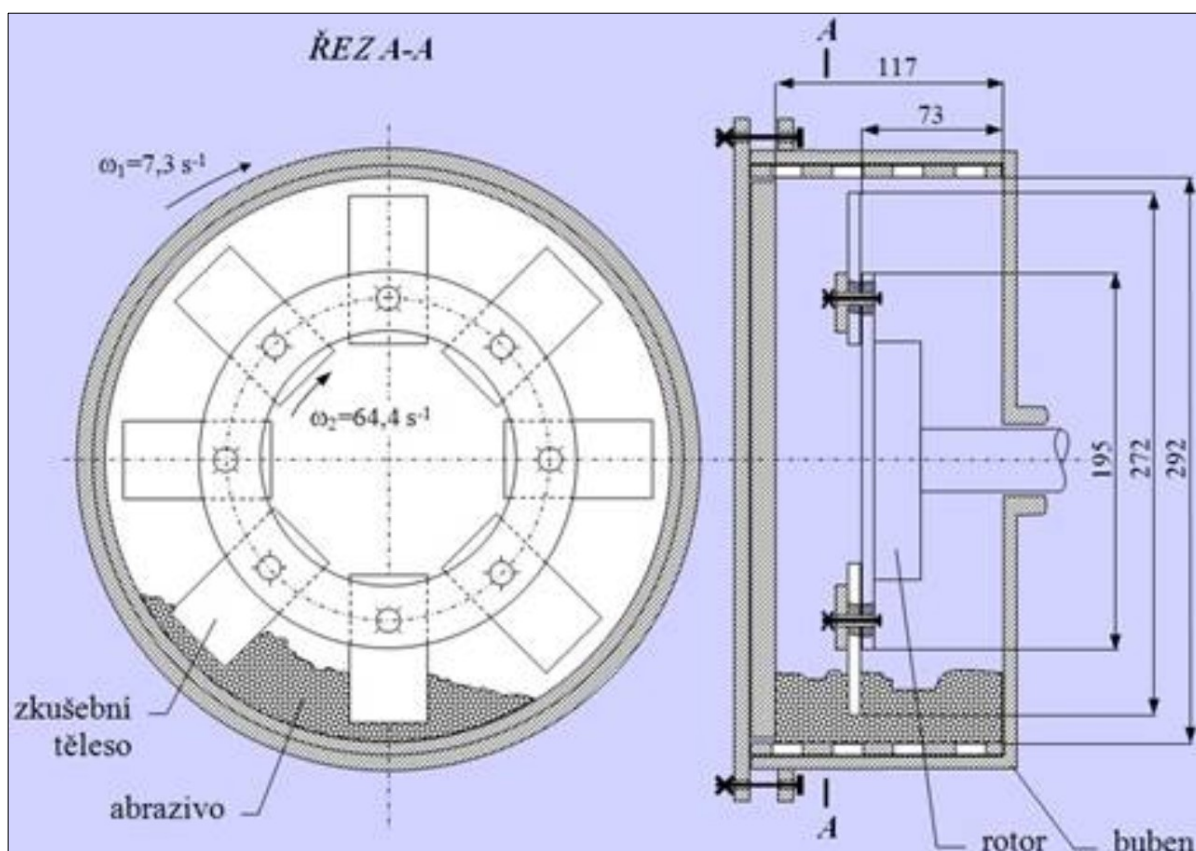


Obr. 16: Miller Number Slurry Abrasivity Test Machine [21]

2.4.5.2 Nestandardní zkouška

Jednou z nestandardních metod měření abrazivity je metoda podle Bonda. Informace i obrázek o této metodě poskytl Výzkumný ústav stavebních hmot a.s., prostřednictvím e-mailu, viz můj osobní e-mail 12.4.2019 18:40. Ukázka bondova bubnového přístroje je na obrázku 17.

Princip této nenormalizované zkoušky je zajištění úbytku hmotnosti kovové (duralové) lopatky v bubnu při jeho otáčení. Zkouška byla vyvinuta studiem dostupné literatury a používá se jako „standardní operační postup“. Tato metoda je v současné době široce využívána, např. u abraze břitů zařízení pro orbu v zemědělství. Laboratorní zkouška opotřebení se provádí ve volném abrazivu. Zkušební destičky jsou uchyceny pomocí matic a šroubů k rotoru, který má 64,4 ot/s. Rotor je uložen ve zkušebním bubnu, který se otáčí stejným směrem 7,3 ot/s.



Obr. 17: Bondův přístroj

3 Tuhá alternativní paliva

Existuje celá škála sypkých materiálů. Do této práce jsem však vložil ukázkou materiálů, které slouží ke spalování v cementárenském průmyslu v rotačních pecích. Zadavatel této práce, firma Schenck Process s.r.o., navrhuje dopravní zařízení pro tento specifický typ průmyslu. Tyto materiály se dají všeobecně označit jako „tuhé alternativní palivo“ (TAP). Zmíněné palivo může být složeno buď z homogeních materiálů, jako je například dřevěná štěpka nebo peletky, dále pak z roztrhání odpadu, který obsahuje plast, textil, papír apod., nebo se ještě používají čistírenských kalů.

3.1 Dřevní štěpka [22]

Dřevní štěpka vzniká jako odpad při zpracování dřeva či cíleným drcením dřevních částí. Řadí se k tuhé biomase, sloužící k výrobě tepla nebo kompostu. Dřevní štěpka je štěpené kusové dřevo s výhodou lepšího skladování, menší obsahu vody a po spálení méně popelu oproti běžnému dřevu. Je velká 2,5 až 5 cm. Názorná ukázka je na obrázku 18. Někdy se lisuje do pelet či briket pro lepší zpracovatelnost.

3.2 Dřevěné pelety [23]

Dřevěné pelety se vyrábějí lisováním dřevěných pilin a hoblin jako vedlejší produkt při zpracování dřeva. Vyznačují se extrémní hustotou a nízkým obsahem vody. Používají se jako kvalitní ekologické palivo. Obsah vody je důležitým parametrem pro výhřevnost paliva i dlouhodobé opotřebení kotlů, proto by vstupní materiál měl být před vlastní peletizací vhodně dosušován v sušárnách. Má stejné výhody oproti běžnému dřevu jako dřevěná štěpka. Názorná ukázka je na obrázku 19.



Obr. 18: Dřevní štěpka



Obr. 19: Dřevěné peletky [24]

3.3 RDF

RDF je zkratka pro Refuse Derived Fuel, dá se říct, že je to roztrhání tuhý odpad ke spalování. Jedná se o komunální i průmyslový odpad, který zahrnuje biologicky odbouratelné materiály, gumu,

plast atd. RDF prošel kompletními recyklačními a třídícími procesy, aby byl shopen trvale hořet bez pomocných látek a co nejvíce se omezil výskyt nebezpečných látek. V tomto odpadu se dále nachází dřevo, textil, papír, případně nechtěné kovové části, sklo, keramika, kamení, písek atd.

Nýže uvedený vzorek materiálu na obrázku 20 s modrou propiskou obsahuje převážně textil a vzorek na obrázku 21 s červenou propiskou obsahuje převážně plastové kusy sáčků a obalů. Oba tyto vzorky jsou odběrem ze stejného provozu.



Obr. 20: Ukázka prvního vzorku RDF



Obr. 21: Ukázka druhého vzorku RDF

3.4 Kaly z čistíren odpadních vod [25]

Čistírenské stabilizované odvodněné kaly jsou jedním ze základních odpadních produktů čistíren odpadních vod. Kal je hmota tmavě hnědé barvy, vyhnílý a má slabý zápach. Kaly obsahují abrazivní písek, těžké kovy a toxické látky. Je tedy považován za biologicky nebezpečný. Tento materiál může velice rychle způsobit dopravníkům odstávku zařízení z nutnosti výměny žlabu dopravníku z důsledku opotřebení. Tato výměna může být nutná již po pár měsících a může tak způsobit odstávku celé dopravní linky. Proto u tohoto materiálu velice záleží na zvoleném materiálu žlabu, se kterým dopravovaný materiál přichází do styku. Názorná ukázka je na obrázku 22, 23 a 24. Na těchto obrázcích lze vidět kaly od jemné zrnitosti až po hrubou zrnitost. Všechny tři vzorky jsou odběrem ze stejného provozu.



Obr. 22: První ukázka kalů



Obr. 23: Druhá ukázka kalů



Obr. 24: Třetí ukázka kalů

3.5 Velikost, tvar a složení z praxe

Pro popis tvaru částice se v praxi používá obecný popis, např. RDF materiál s velikostí zrn od 30 do 70 mm a s tvarem zrn 2D a 3D. Tvar zrn definuje počet převládajících rozměrů zrna. Pro 1D to může být dlouhý úzký tvar, něco jako vlákno, 2D může být např. sáček, destička apod. a 3D zrno má znatelný rozměr ve všech souřadnicových osách.

Zákazník složení materiálu kolikrát ani s jistotou nezná, a i kdyby ho znal, tak s každou várkou dodaného sypkého materiálu se dané složení může znatelně lišit. Proto se udává jen obecné složení, jako například RDF. Existují i požadavky na dopravu materiálů, které jsou homogení, např. výše zmíněná dřevní štěpka, peletky nebo městkárenské kaly.

Dalším důležitým faktorem složení materiálů je vlhkost. Ta výrazně ovlivňuje kluzné tření, kdy suché kluzné tření přechází na kluzné tření s hydrostatickým mazáním. Vlhkost je i proto klíčový faktor pro návrh zařízení a určuje se v procentech. Obecně se dá říct, že vlhkost nad 20% začíná být problém a nad 40% už je to vážný problém. Zařízení je pak ve velké míře opotřebováváno korozí, a navíc dopravujete i vodu v materiálu, kterou zákazník určitě nechce spalovat. To se pak řeší sušičkou, do které se, ale stejně materiál musí v nějakém zařízení dopravit. Na takovou dopravu je zásadní specificky navrhnout dopravní zařízení.

4 Návrh konceptu

4.1 Kritéria konceptů

Pomocí zařízení má být umožněno testovat abrazivitu sypkého materiálu. Zařízení se mělo navrhnout jako přenosné. To umožní obsluhu se zařízením cestovat k zákazníkům do cementáren, test centru a do podobného prostředí. Na podnět z firmy Schenck Process jsem měl při návrhu uvažovat i nad dalšími funkcemi, jako je měření sypného úhlu, kompresivity a stanovení úhlu vnitřního tření, které se stanovuje ze znalosti smykové síly při různých zatíženích.

4.1.1 Měření sypného úhlu

V praxi není možné určit přesný sypký úhel nehomogenního sypkého materiálu. Měření této vlastnosti při větší zrnitosti se může provádět i pomocí úhlooměru při nasypávání materiálu na rovné ploše na hromádku o potřebném objemu. Pro firmu Schenck Process měření této vlastnosti materiálu není podstatné, proto jsem to do kritérií návrhu zařízení nezařadil.

Dynamický sypný úhel by však mohl poskytovat zajímavou informaci o materiálu. Bylo by ho možné měřit v rotujících válcích, pokud by se tomu návrh přizpůsobil. Avšak toto kritérium by mělo znatelný vliv na velikost rotujícího válce. To se může ve výsledku ukázat jako nepřijatelné.

4.1.2 Měření hustoty sypkého materiálu

U této vlastnosti se vychází ze změření prázdné měřicí nádoby a poté změření stejné nádoby s nestlačeným materiálem se známým objemem. Výsledný rozdíl hmotnosti je sypná hustota nestlačeného materiálu. Eventualně se dá změřit setřesná hustota. Při tomto měření se musí materiál v nádobě sklepat, a když se materiálem v nádobě sklepe, vyjádří se výsledný objem k objemu nestlačeného materiálu, tak aby se s výsledky dalo pracovat. Měření se běžně provádí v kbelíku. Pro firmu Schenck Process měření této vlastnosti materiálu není podstatné, proto jsem to do kritérií návrhu zařízení nezařadil.

4.1.3 Měření kompresivity

Bylo by vhodné, aby zařízení dokázalo měřit kompresivitu sypkého materiálu. Pro měření kompresivity by bylo zapotřebí vytvořit možnost stlačení materiálu v nádobě. V nádobě by se musel dát měřit objem materiálu.

4.1.4 Měření smykové síly

Bylo by vhodné, aby zařízení dokázalo měřit „smykovou sílu“ neboli, tlačnou sílu při toku materiálu ve střížné uzavřené nádobě, tak jak je popsáno v rešerši. Změřením tlačných / smykových sil pro různá zatížení a zanesením do σ - τ diagramu je možné stanovit pomocí Mohrových kružnic, kohezivitu, úhel vnitřního tření, efektivní úhel vnitřního tření a tokovou křivku, viz rešerše. Při průběžném získávání informací o měření smykové síly na Janíkeho stroji jsem zjistil od prof. Ing. Jiří Zegzulka, CSc., že není možné zakomponovat tuto funkci do mobilního zařízení na měření abrazivity.

4.1.5 Testování abrazivity

V navrhnutém konceptu musí vznikat dostatečné viditelné opotřebení vzájemným silovým působením funkčního povrchu vzorku a částic testovaného materiálu. Toto viditelné opotřebení bude jasným signálem, kterou cestou by se měl vývoj zařízení ubírat.

4.1.6 Materiál vzorku

Materiál, ze kterého se budou vzorky vyrábět, musí být snadno opotřebovatelný, aby bylo snadné dosáhnout pozorovatelných / měřitelných projevů abrazie. Dále je potřeba zajistit stabilní dostupnost vzorků na testování abrazivity. Zkušební vzorek je v koncepční fázi z plastu a z oceli v podobě žiletek "Wilkinson sword". Vzorky z plastu jsou snadno dostupné i v omezeně libovolných tvarových variacích díky 3D tiskárně ve firmě Schenck Process. Žiletky jsou také snadno dostupné ve standardní kvalitě.

4.2 Úvaha o návrhu prototypu

Testování abrazivity se provádí buď pozorováním změny povrchu vzorku opotřebeného zkouškou, nebo rozdílem v hmotnosti zkušební vzorku před a po zkoušce.

Výsledkem této diplomové práce bude prototyp zařízení, kterým se bude vytvářet databáze, podle které se bude v rámci možností vyhodnocovat míra abrazivity nově testovaných materiálů. Výsledkem testu bude číslo odpovídající vytvořené stupnici abrazivity. Ta bude tvořena z dat o opotřebení používaných strojních zařízení v kombinaci s typem a průtokem dopravovaného materiálu. Do této databáze by se mohly ukládat i další data o vlastnostech materiálů jako je sypná hustota, sypný úhel a pokud možno, tak i úhel vnitřního tření. Tato databáze se bude tvořit až v rámci samotného vývoje R&D oddělení v Schenck Process s.r.o.

Při tvorbě této databáze bude cílem získat materiál od zákazníků k testování, a pokud to bude možné, tak i skutečné podmínky provozu s daty o opotřebení zařízení. V nejhorším případě se vychází pouze z informací o materiálech a provozu zaslané od zákazníků při zadávání zakázky. Avšak při návštěvě cementárny, např. při uvádění zařízení do provozu, by se materiál dal otestovat. Získaná data, by se daly porovnávat s četností prodeje náhradních dílů. Dále bude možné přijít k materiálu při různ. servisních pracích apod. Jelikož se běžně stává, že každým kamiónem dovezený materiál je víceméně jiný, není možné považovat výsledky i samotný vzorek dopravovaného materiálu za zcela reprezentativní. Proto by mohlo být vhodné testovat materiál při každé návštěvě.

Je tedy žádoucí, aby prototyp nebo jeho inovovaná verze byla schopna se vlézt do kufru na cestu za zákazníkem.

4.3 Návrhy konceptů

4.3.1 Materiál vzorku ovlivněného abrazí

Plast [26]

V R&D Schenck Process s.r.o. se tisknou prototypy a součásti strojů z plastu, proto i návrhy konceptů budou tisknuté z plastu. Konkrétně z plastu ABS s tvrdostí v rozmezí 50-90HB, viz výsledné tabulky měření tvrdostí plastů z bakalářské práce Daniela Fabrigera. Ten při měření zaznamenal 23°C a 50% relativní vlhkost vzduchu. Měření vlhkosti prováděl ocelovou kuličkou o průměru 5 mm s dobou vtlačování 30 s. Měřeno podle DIN normy.

Žiletka [27]

Žiletka je plochý, velmi tenký plíšek z pérové nebo z martenzitické korozivzdorné oceli s velmi tenkým ostřím. Díky velmi tenkému ostří by mělo být možné pozorovat vliv opotřebení na tomto ostří, i přesto, že je to kvalitní ocel.

4.3.2 Vizuální vyhodnocení

Vyhodnocení vlivu abrazivity na navržených konceptech bude pouze vizuální. Jelikož se jedná o koncepční fázi, považuji toto vyhodnocení za dostačující pro zhodnocení vhodnosti konceptu k dalšímu vývoji. Po otestování se vzorky umyjí a vizuálně se zhodnotí s vedoucím vývojového oddělení. Pro snazší pozorování vlivu abrazivity se dá uvažovat o pořízení kvalitní fotografie, zároveň je to vhodné řešení zaznamenání vizuální úrovně abrazivity testovaného materiálu.

4.3.3 Stupnice a databáze výsledků

Obrazový záznam není z praktického hlediska efektivní pro tvorbu databáze výsledků. Vyskytovala by se velká míra chybovosti v interpretaci výsledku opotřebení. Mnohem validnější by byla databáze tvořená z dat změny hmotnosti vzorků. Z dat experimentálních měření abrazivity by se vytvořila databáze a z ní stupnice vlivu opotřebení. Stupnice by měla rozsah do 100 pro snazší orientaci ve stupních. Jako nejhorší opotřebení bych uvažoval čistým pískem, proto by jeho stupeň byl 100. Zato opotřebení měkkými materiály např. z RDF, bez abrazivních minerálních částic, by mělo hodnotu např. 10. Časem by se mezi tyto hodnoty začali řadit další otestované materiály. V průběhu času by se stupnice jistě měnila v závislosti na zkušenostech a výsledcích nových měření a dat z provozu. Nicméně, po nespecifikované době může vzniknout funkční stupnice, která bude vypovídat o schopnosti abraze materiálu v čase, když se materiál úspěšně zařadí. Do databáze materiálům se neustále budou přiřazovat i vliv opotřebení z praxe, které může trvat i roky, než se nahromadí vhodné množství údajů. Ve výsledku by práce se stupnicí mohla vypadat následovně. Materiál s hodnotou stupně 69, dokázal opotřebit žlab dopravníku na mezní úroveň tloušťky za 2 roky provozu. Při takovém uvažování se dá předpokládat pravděpodobnost, že materiál s vyhodnoceným stupněm 75, bude mít na žlab větší abrazivní účinek. Podle těchto informací se dá přistupovat k úpravám standardizovaných zařízení pro konkrétní zakázky. V takovémto případě by firma disponovala dalším nástrojem, který by ji i nadále pomáhal obhájit své stávající místo na trhu.



Obr. 25: Ukázka stupnice

4.3.4 Testování abraze pomocí lopatek

Pro tuto metodu uvažuji vzorek v podobě plastových lopatek nebo připevněných žiletek, viz obrázek 26, vyznačené oranžově. Vzorky by byly připevněné k rotačnímu vnitřnímu válci uvnitř nehybného válce / rámu. Sypký materiál by se přidal v rozumné míře dovnitř nehybného válce a otáčením vnitřního válce se vzorky, by docházelo k tření mezi vzorky a testovaným materiálem. Vzorky by se mohli vyhodnocovat podle hmotnosti a vizuálně.

4.3.5 Testování abraze pomocí plastových krychliček

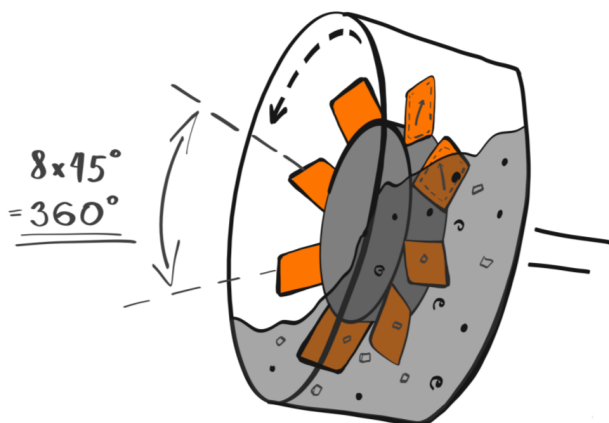
V této metodě jsem se inspiroval metodou podle Bonda. Vzorky by byly vytisknuté plastové krychličky. Ty by se tvořily prostřednictvím 3D tiskárny ve firmě. Vzorky by se vystavily opotřebení v rotujícím bubnu s testovaným materiálem, viz obrázek 27. Vzorky jsou vyznačené oranžově. Vzorky by se mohli vyhodnocovat podle hmotnosti a vizuálně. V tomto řešení by se zároveň dal měřit synpý dynamický úhel materiálu. Stačilo by k tomu průhledné víko a vizuálně zaznamenat tvořící se úhel.

4.3.6 Testování abraze pomocí posuvného vzorku

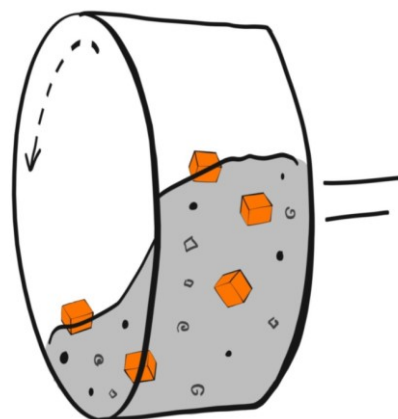
V dalším návrhu metody by se materiál uzavřel dovnitř hranaté nádoby. Třením mezi posuvným vzorkem, vyznačený oranžově, a materiálem by se projevila abraze, viz obrázek 28. Vzorek by se vyměňoval pro jednotlivá měření. Testovaný materiál by se mohl i stlačit nastavitelným víkem. Nastavením stlačení materiálu můžeme napodobit podmínky stavu materiálu v násypce, kde bývá materiál stlačen vlastní vahou sloupce materiálu. Vzorky by se mohly vyhodnocovat podle hmotnosti a vizuálně.

4.3.7 Testování abrazie pomocí rotujícího víka

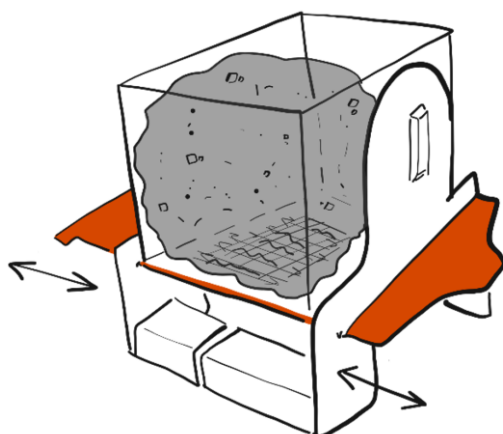
V posledním návrhu metody jsem uvažoval válcovou nádobu naplnit testovaným materiálem a stlačit poháněným víkem. Na víku by mohl být připevněny vzorek ve tvaru disku, vyznačený oranžově, viz obrázek 29. Nastavením stlačení materiálu, se mohou napodobit podmínky stavu materiálu v násypce, kde bývá materiál stlačen vlastní vahou sloupce materiálu. Třením mezi víkem a materiálem by se projevovala abrazie. Vzorek by se vyměňoval pro jednotlivá měření. Vzorky by se mohli vyhodnocovat podle hmotnosti a vizuálně.



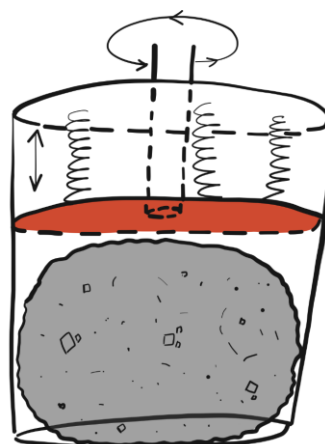
Obr. 26: Náčrt konceptu s lopatkami



Obr. 27: Náčrt konceptu s krychličkami



Obr. 28: Náčrt konceptu s posuvným vzorkem



Obr. 29: Náčrt konceptu s rotujícím vzorkem

4.4 Princip měření abrazivity a další možnosti

4.4.1 Testování pomocí válce s lopatkami

Tento návrh jsem vyvynul v podobnosti s testovacím zařízením podle Bonda. 3D model pro testování konceptu jsem zjednodušil oproti návrhu konceptu na čtyři vysouvací lopatky / vzorky namísto osmi a úhel natočení byl vynechán, ten měl být původně 45°. Tento koncept jsem chtěl otestovat na reálném modelu, proto jsem se rozhodl s ním pracovat dál. Ukázka navrženého 3D modelu je na obrázku 30. Zařízení se dalo teoreticky donavrhnut k možnosti měření kompresivity a smykové síly jako na Janikeho stroji. Princip měření kompresivity i smykové síly se mi nezdál jako optimální řešení.

Měření kompresivity

Měření kompresivity by mělo být možné při vytažení kola s lopatkami za využití prázdného prostoru uvnitř válce ve spojení s víkem, které by mohlo případně vytvářet tlak na materiál. Měřila by se změna objemu, posuvem víka o zmeřitelnou vzdálenost. Měření by probíhalo posuvným měřítkem nebo hloubkoměrem.

Měření smykové síly

Měření smykové síly by mělo být možné při návrhu válce ze dvou polovin při vytažení kola s lopatkami za využití prázdného prostoru uvnitř válce. Návrh by připomínal Janikeho smykový stroj.

4.4.2 Testování pomocí bubnu s plastovými krychličkami

Tento koncept jsem během navrhování zamítl. Koncept mi začal připadat nevhodný. Předpokládám, že vzorky by se při malých rychlostech opotřebovali až za delší dobu, než dokážeme dosáhnout výsledků u jiných konceptů. Vysoké rychlosti zde nejsou možné z důvodu odstředivých sil, které by vzorky zabořily do materiálu. V takovém fyzikálním stavu by nedocházelo k hodnotnému testování abrazivity. Nemluvě o vlivu kontaktu vzorků se stěnou bubnu. Další nevýhoda u plastových krychliček je, že po zkoušce tyto vzorky mohou být pod návaem materiálu a obsluha by je musela hledat. U tohoto koncept se přitom vyskytuje nebezpečí vycházející z rotujících částí, které se musí podle směrnice 2006/42/EU vyřešit krytováním. Krytování zařízení může zkomplikovat konstrukci a obsluhu zařízení.

4.4.3 Testování pomocí válce se žiletkami

Tento návrh jsem vyvynul v podobnosti s testovacím zařízením podle Bonda, ale namísto lopatek jsem použil žiletky. Jejich ostří představují relativně snadno opotřebitelný prvek. Žiletky jsou usazené na držáku žiletek, který je uložený na hřídeli. Na ostří žiletky by se mohlo projevit pozorovatelné opotřebení z testování materiálu. Návrh konceptu má čtyři držáky pro žiletky pod 45° úhlem natočení, proti směru otáčení. Ukázka navrženého 3D modelu je na obrázku 31. Zařízení se dalo teoreticky donavrhnut k možnosti měření kompresivity a smykové síly jako na Janikeho stroji. Princip měření kompresivity i smykové síly se mi nezdál jako optimální řešení.

Měření kompresivity

Měření kompresivity by mělo být možné při vytažení držáku s žiletkama za využití prázdného prostoru uvnitř válce ve spojení s víkem, které by mohlo případně vytvářet tlak na materiál. Měřila by se změna objemu, posuvem víka o zmeřitelnou vzdálenost. Měření by probíhalo posuvným měřítkem nebo hloubkoměrem.

Měření smykové síly

Měření smykové síly by mělo být možné při návrhu válce ze dvou polovin při vytažení kola s lopatkami za využití prázdného prostoru uvnitř válce. Návrh by připomínal Janikeho smykový stroj.

4.4.4 Testování pomocí nádoby s posuvným vzorkem

V tomto návrhu jsem se inspiroval zařízením na testování kompresivity, dutý válec pro stlačení materiálu a následného měření rozdílu objemu. Navrhl jsem dutou nádobu ze dvou polovin pro naplnění materiálem, podobně jako Janikeho stroj na zaznamenávání smykové síly. Tento návrh měl mít možnost stanovit stupeň abrazivity, kompresivitu, úhly vnitřního tření, kohezivitu, tok materiálu a další vlastnosti, které se stanovují ze znalosti chování smykové síly ve zkoušce na Janikeho stroji. Později se ukázalo, že jakékoli zkoušky připodobňované Janikeho zkoušce by nebyly validní. Ukázka navrženého 3D modelu je na obrázku 32. Princip měření kompresivity i smykové síly se mi zdál jako optimální řešení.

Měření kompresivity

Měření kompresivity by mělo být možné při využití prázdného prostoru uvnitř nádoby ve spojení se zatížením víka, které by vytvářelo tlak na materiál. Měřila by se změna objemu, posuvem víka o zmeřitelnou vzdálenost. Měření by probíhalo posuvním měřítkem nebo hloubkoměrem.

Měření smykové síly

Měření smykové síly mělo být možné při návrhu nádoby ze dvou polovin. Návrh by připomínal Janikeho smykový stroj.

4.4.5 Testování pomocí válce s rotujícím víkem

Nad tímto návrhem jsem začal uvažovat, až po otestování vytisknutých modelů. Tato metoda testování abrazivity se dá přirovnat k metodě z předešlé kapitoly 4.4.4. Přistupuji tedy k tomuto konceptu, jako k funkčně velice podobnému řešení. Uvnitř dutého válce by byl připevněný vzorek napojený na pohon. Rotující část zařízení by tedy byla zakrytá. Vzorek by se nacházel pod testovaným materiálem z důvodu lepšího kontaktu díky gravitaci a propadávání nejmenších částic skrz sloupec materiálu. Právě tyto nejmenší částice mohou mít i největší vliv na opotřebení. Válec by měl být dutý se vzorkem na dně válcové nádoby, připevněným ke hřídeli. V tomto návrhu jsem se také inspiroval zařízením na testování kompresivity.

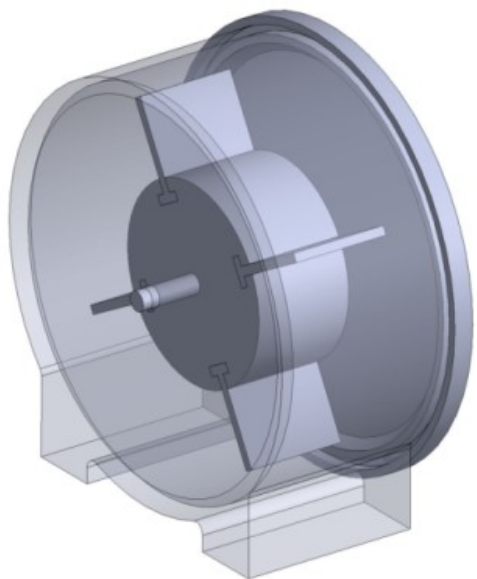
Měření kompresivity

Měření kompresivity by mělo být možné při využití prázdného prostoru uvnitř válce ve spojení se zatížením víka, které by vytvářelo tlak na materiál. Měřila by se změna objemu, posuvem víka o zmeřitelnou vzdálenost. Měření by probíhalo posuvním měřítkem nebo hloubkoměrem. Princip měření kompresivity se mi zdál jako optimální řešení.

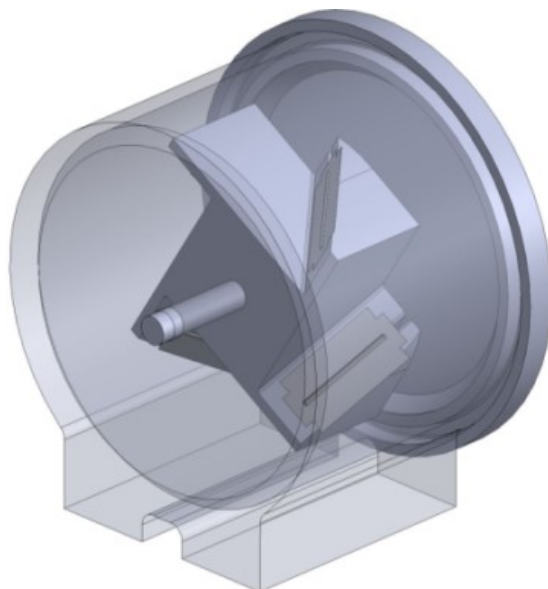
Měření smykové síly

V průběhu práce na návrhu zařízení jsem zjistil, že pro měření smykové síly by nejkratší nádoba stěny musela mít min. okolo 1000 mm. Při stanovení takové hodnoty jsem vycházel z příkladu, kde by nejmenší částice materiálu byly ≥ 5 mm. Jelikož princip Janikeho měřicího stroje je postavený na měření smykové síly působící na klec naplněnou materiálem, který splňuje podmínku min. velikosti průměru klece. Touto podmínkou minimálního průměru klece je dvoustý násobek nejmenšího zrna testovaného materiálu.

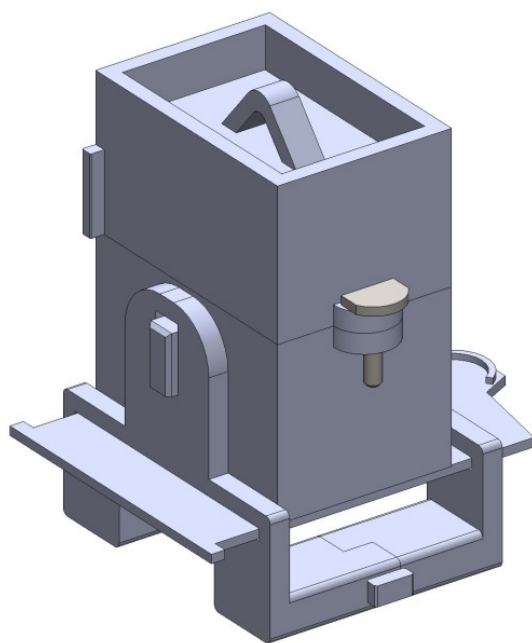
Proto jsem měření smykové síly pro tento návrh již nezamýšlel.



Obr. 30: 3D model válce s lopatkami k vytisknutí



Obr. 31: 3D model válce se žiletkami k vytisknutí



Obr. 32: 3D model k vytisknutí

5 Plastový tisk navržených konceptů

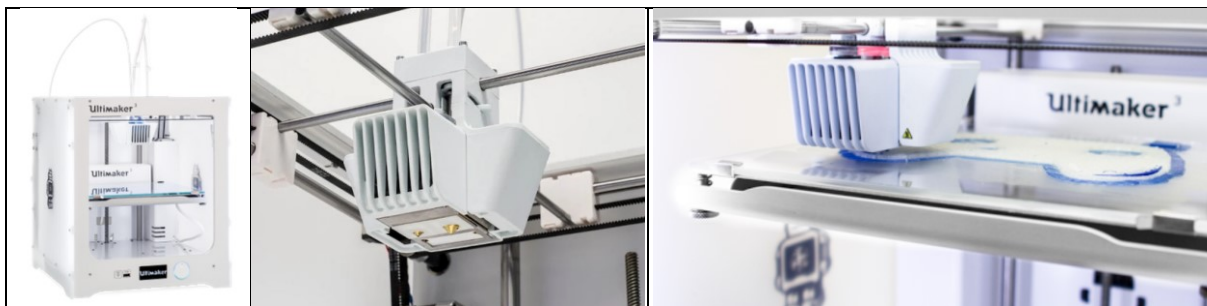
5.1 3D tisk

3D tisk neboli aditivní výroba, také inkrementální nebo přírůstková výrobní technologie (anglicky 3D printing neboli additive manufacturing (AM)) je proces tvorby třídimenzionálních pevných objektů z digitálního souboru (Additive Manufacturing File – AMF). V aditivních procesech je objekt vytvořen pokládáním souvislých vrstev materiálu, dokud není celý projekt dokončen. Každá z těchto vrstev může být považována za úzce rozříznutou horizontální sekci daného objektu.

5.1.1 3D tiskárna - Ultimaker 3

Ultimaker 3 je 3D tiskárna, která se kvalitou tisku pomalu blíží k průmyslovým tiskárnám. Tuto tiskárnu jsem použil pro tvorbu plastových prototypů této práce. Při mém typu nastavení je pracovní prostor 3D tiskárny XYZ: 195x195x200 mm. Velikost průměru trisky je možné nastavit na 0,25, 0,4 a 0,8 mm. Tím se i definuje kvalita a rychlost tisku. Rychlost tisku u této tiskárny dosahuje až 24 mm³/s.

Výrobce pro tuto tiskárnu vydal software Ultimaker Cura. V softwaru lze nastavit velice obsáhle možnosti tisku. Ultimaker Cura je navrženým, aby si většinu parametrů dopočítal při zadání zásadních parametrů sám. Mezi nejzásadnější parametry patří průměr trisky, výplň výtisku, typ tisknutého materiálu, teplota tisknutí, rychlost tisku, chlazení, teplota podložky a nastavení podpor tisknutého objektu.



Obr. 33: Tiskárna[28]

Obr. 34: Hlava s dvěma tryskami [28]

Obr. 35: Tisknutí na nahřívanou podložku [28]

5.2 Kvalita tisku

Kvalita tisku závisí především na tloušťce tisknuté vrstvy, ta se v programu dá bez varování nastavit až na 0,3mm. Dalším velice důležitým parametrem je tloušťka trisky, která je pro firemní účely nastavena na 0,8 mm. Další parametry související s kvalitou tisku se automaticky dopočítají z těchto dvou zadaných parametrů.

Triska s průměrem 0,8 mm je pro tisknuté modely naprosto postačující. Tato triska má podle výrobce přesnost 20-600 mikrometrů a byla zvolena z důvodu rychlosti tisknutí, při dostatečné kvalitě tisku. Při tisku s triskou 0,25 nebo 0,4 mm by tisk byl sice znatelně kvalitnější, ale i znatelně pomalejší, a to dvou až čtyř-násobně.

Kvalita tisku půdorisně rotačních dílů se musí nastavit v softwaru, kde se modelují díly. To jsem provedl v programu SolidWorks. Při exportování do souboru STL (importovatelný soubor pro software 3D tiskárny) na nejvyšší nastavení, aby se předešlo zjednodušování obvodu kruhu na vícehran.

Tisk probíhal při nastavení kvality tisku, viz obrázek 36:

Quality		
Layer Height	0.3	mm
Initial Layer Height	0.27	mm
Line Width	0.4	mm
Wall Line Width	0.4	mm
Outer Wall Line Width	0.4	mm
Inner Wall(s) Line Width	0.34	mm
Top/Bottom Line Width	0.4	mm
Infill Line Width	0.57	mm
Skirt/Brim Line Width	0.4	mm
Support Line Width	0.4	mm
Initial Layer Line Width	120	%

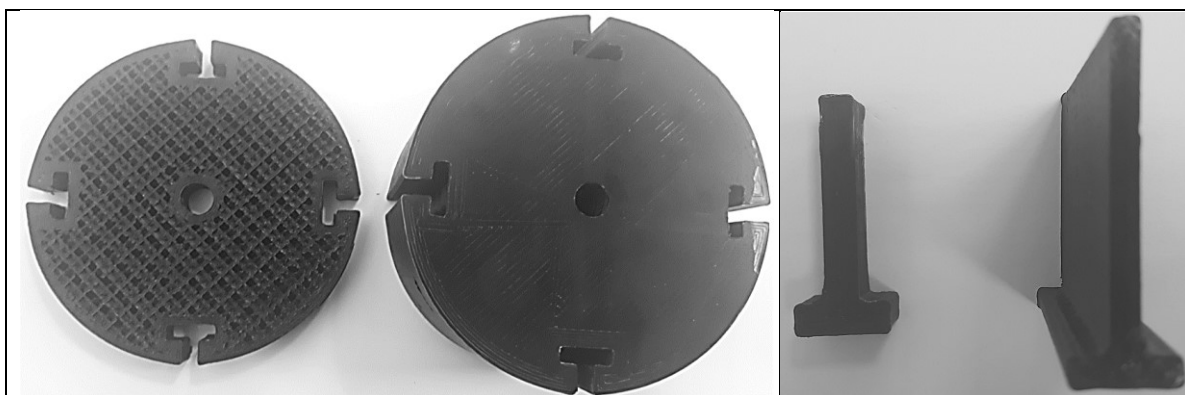
Obr. 36: Nastavení kvality tisku

5.3 První vrstva

Při začátku tisku je naprosto zásadní nanesení první vrstvy na předehřátou podložku. První vrstva tvoří základ celého objektu. Pokud tento základ není perfektně přichycen, hrozí, že tisk nebude úspěšný. Nastavená teplota byla 80°C. Tato teplota je volena přednostně pro jakýkoliv tisk plastem ABS.

5.4 Výplň výtisků

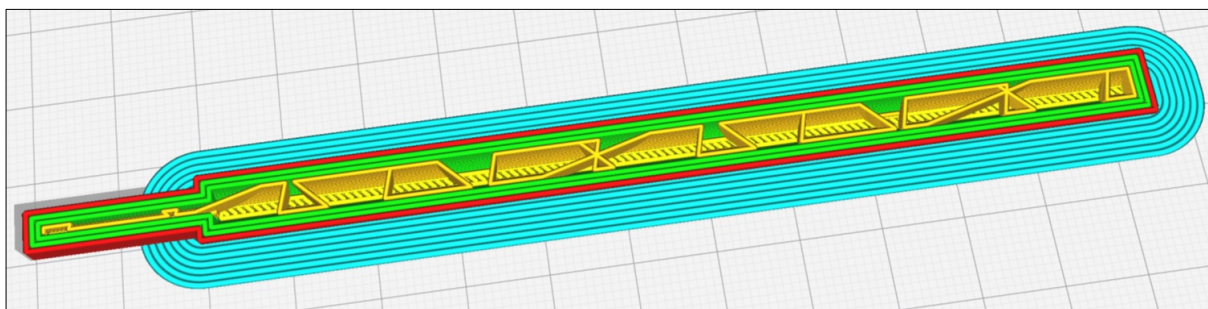
Výplň výtisku se myslí vnitřní struktura tisknutého modelu. Před tiskem se nastavuje výplň modelu. Výplň je buď 100%, nebo vyplněná paternem. Patern se do modelu v softwaru dotváří automaticky, vnitřek modelu je nahrazen paternovou sítí, kterou lze před tiskem přednastavit. Výplň paternem jde nastavit procentuálně, ale u modelů s tenkou stěnou patern aplikovat nejde a výplň musí zůstat na 100%. Rozdíl lze zřetelně vidět na ukázce níže. Na obrázku 37 je ukázka výplň typem paternu a na obrázku 38 je ukázka dvou tenkostěnných dílů bez možnosti nastavení tisku s paternovou výplní. V tomto případě se jednalo o lopatky do jednoho z konceptů, přičemž tlustější díl nalevo měl tloušťku stěny 6mm.



Obr. 37: Paternová výplň Octet na součásti o průměru 100mm

Obr. 38: Díly bez paternové výplně

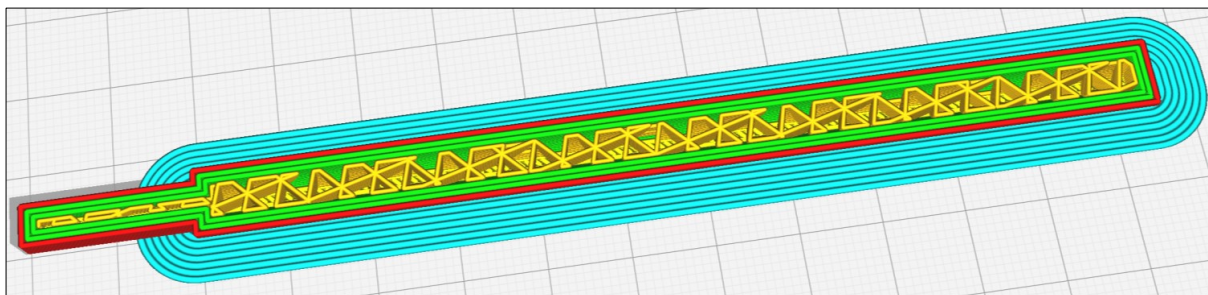
5.4.1 Ukázky z tisku hřídele



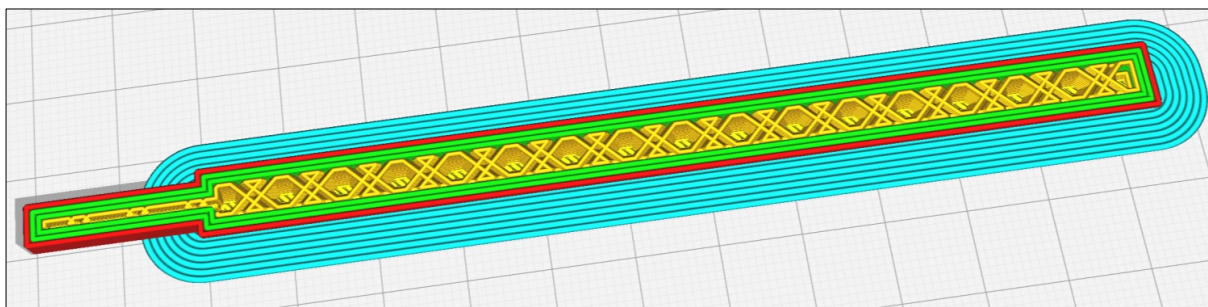
Obr. 39: Obrázek výplně hřídele s 15% výplní paternem Triangles



Obr. 40: Ukázka vlivu zatížení tlačení palců na hřídel o průměru 8 mm s 15% výplní paternem Triangles



Obr. 41: Obrázek výplně hřídele s 50% výplní paternem Triangles



Obr. 42: Obrázek výplně hřídele s 50% výplní paternem Octet.

Pro tisk hřídele byla zvolena výplň 50% s paternem Octet, při tomto vyplnění a stejném zatížení se hřídel deformovala pouze vratně a byla použita pro oba koncepty s hřídelí.

5.5 Použitý materiál

K tisku navržených konceptů jsem použil plast Akrylonitrilbutadienstyren (ABS). Je to amorfní termoplastický průmyslový kopolymer, který je odolný vůči mechanickému poškození. Tuhý, houževnatý, odolný proti nízkým i vysokým teplotám, málo nasáklavý, zdravotně nezávadný. Je odolný vůči kyselinám, hydroxidům, uhlovodíkům, olejům, tukům. ABS je velmi lehce opracovatelný.

5.6 Teplota tisku

Nejlepší kvalita tisku materiálu ABS je na použité tiskárně dosažena při teplotě tisku 250°C. Tento fakt byl zjištěn kolegy, při tisku jiných dílů.

5.7 Rychlost tisku

Nejlepší kvalita tisku materiálu ABS je na použité tiskárně dosažena při rychlosti 150mm/s. Tento fakt byl zjištěn kolegy při tisku jiných dílů.

5.8 Chlazení

ABS je náchylný na změnu teploty. To se projevuje smršťováním materiálu při tisku. Proto je důležité tisknutý objekt pomalu ochlazovat a podložka při tisku z ABS musí být vyhřívána.

Nastavení chlazení se zadává v procentech a odpovídá maximálnímu výkonu větráčku v 3D tiskárně. Ze zkušeností kolegů je známo, že 10% stačí na většinu tisknutých dílů.

5.9 Teplota podložky

Nejlepší kvalita tisku materiálu ABS je na použité tiskárně dosažena při teplotě podložky 100 až 110°C. Tento fakt byl zjištěn kolegy při tisku jiných dílů.

5.10 Podpory

Podpory při tisknutí modelů plní funkci podpěrné plochy v místě, kde by se nahřátý tisknutý plast vlivem gravitace propadal. Výsledný model by tím pak nesplňoval prostorové rozložení zadaného modelu a namísto toho by vznikl podivný model propletený vlákny plastu. Takovéto podpory se využívají při tisknutí ploch, které mají úhel sklonu k podložce >45°. Software 3D tiskárny si tyto podpory tvoří automaticky při nastavení funkce podpor, a to při propočítání modelu do vrstev tisku. Pěkným příkladem tisku s plochou pod úhlem 45°, je ručka z vytisknutých návrhů 1 a 2. Tyto ručky byly vytisknuty bez podpor a kvalita zmíněných ploch je takřka nerozeznatelná od ostatních ploch výtisku.

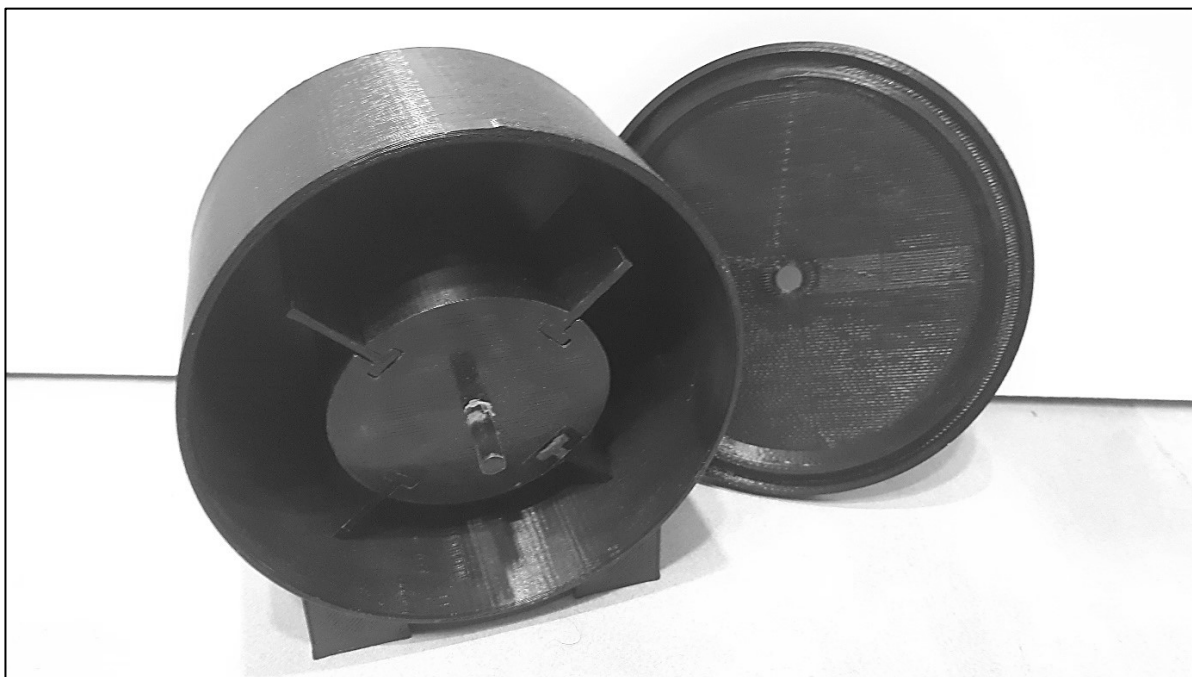
5.11 Nejčastější parametry tisku navrhovaných konceptů

Hodnoty pro 3D tisk byly zadávány podle znalostí z praxe s tiskárnou Ultimaker 3 a podle specifikace tisknutého modelu. Tabulka níže udává nejčastěji použité hodnoty při tisku navrhovaných konceptů.

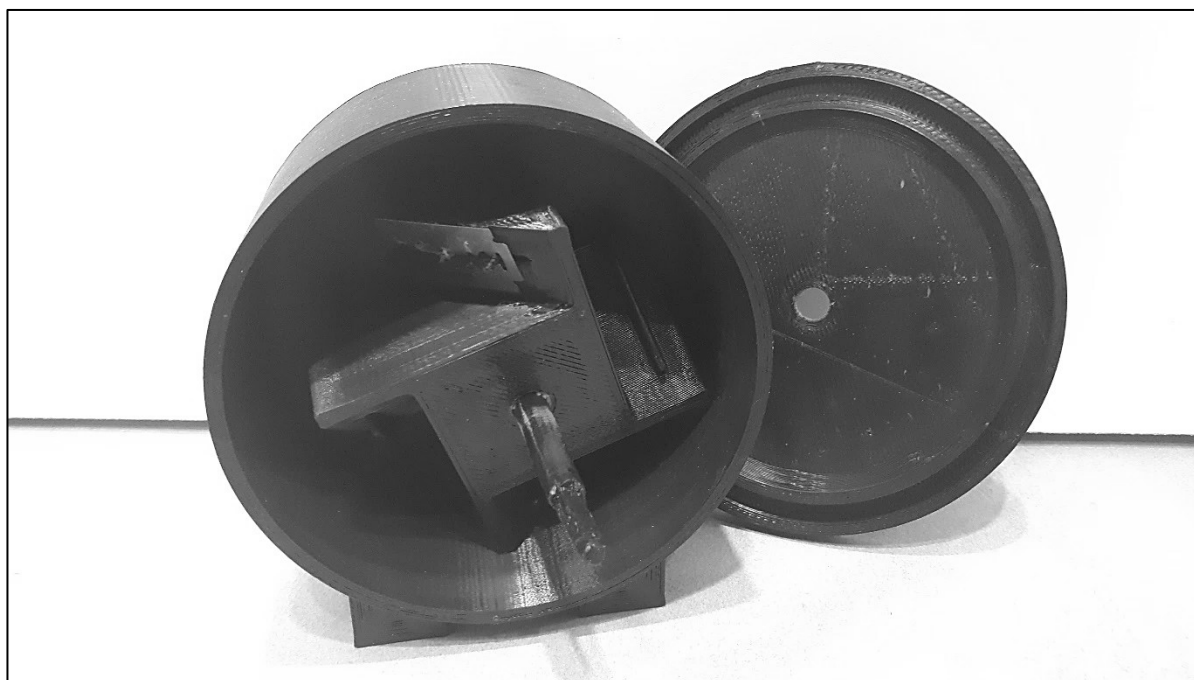
Kvalita tisku [mm / vrstvu]	Výplň výtisků	Materiál	Teplota tisku	Rychlost tisku	Chlazení	Teplota základny	Podpory
0,2 - 0,3	15-25% Octon	ABS	250 °C	150 mm/s	10 %	110 °C	automatické

Tab. 1: Nejčastěji používané parametry při tisku navrhovaných konceptů

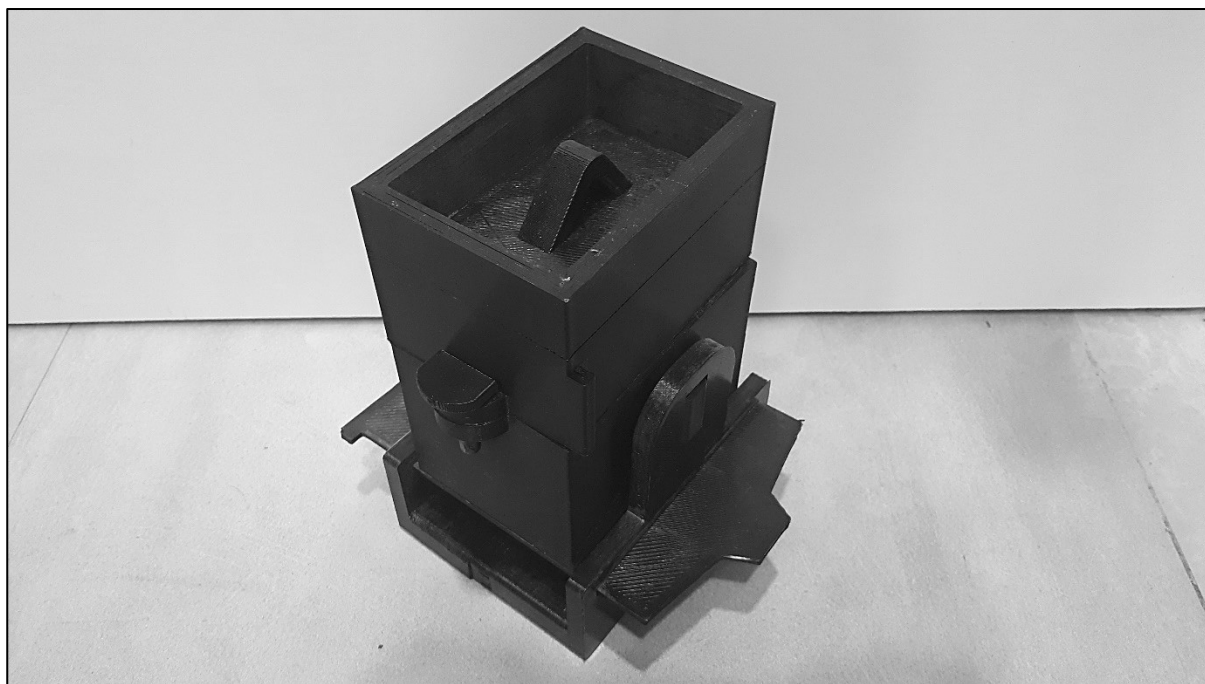
5.12 Vytisknuté koncepty



Obr. 43: Vytisknutý koncept k otestování projevu abraze pomocí lopatek



Obr. 44: Vytisknutý koncept k otestování projevu abraze pomocí žiletek



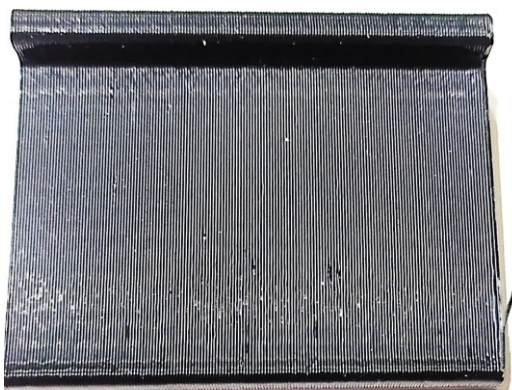
Obr. 45: Vytisknutý koncept k otestování projevu abraze pomocí posuvného vzorku

6 Testování vytisknutých konceptů

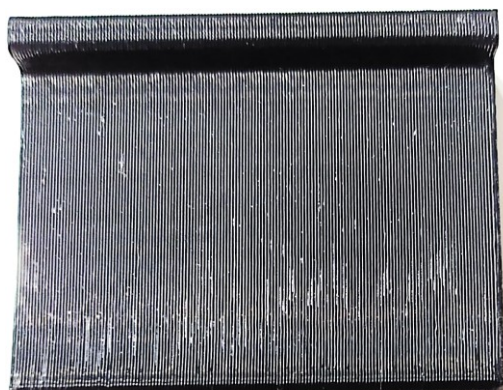
Vzorky byly označeny písmeny znázorňující typ testovaného sypného materiálu. Písmeno P značí písek, K značí kaly a R značí RDF. Každý z těchto materiálů byl použit k testování každého konceptu. V dalších kapitolách jsou jednotlivé testy probrány trochu podrobněji.

6.1 První návrh - Válec s lopatkama

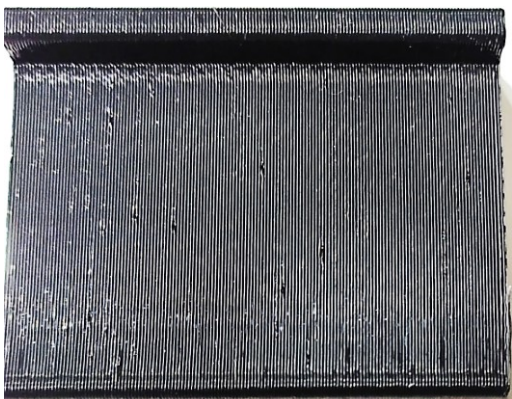
Vytisknutý koncept k testování, viz obrázek 43. Testování bylo provedeno 500 ot. / cykly. Výsledek testovaného konceptu má být vliv abrazivity na povrchu vzorku. Tisknuté vzorky vykazovaly při tisku povrchové vady v podobě shluků plastu vytvářející zdánlivé dířečky v jednotlivých vrstvách tisku. Hodnotil jsem vizuální stránku vzorků, jejich výsledky jsou na obrázcích níže. Porovnávání hmotnosti lopatek před a po testu jsem neprováděl.



Obr. 46: Testovací plocha vzorku před testem



Obr. 47: Testovací plocha otestovaná s RDF



Obr. 48: Testovací plocha otestovaná s kaly z odpadní vod



Obr. 49: Testovací plocha otestovaná s pískem

Závěr

Na vzorcích nebyly takřka žádné známky opotřebení. Veškeré zdánlivé nerovnosti na povrchu jsou zmíněné povrchové vady vzniklé při tisku. Při testování nedocházelo k zamýšlenému kontaktu vzorku s testovaným materiálem. Otáčením vnitřního válce ve válcové nádobě docházelo spíše k nabírání testovaného materiálu na vzorek. Ten si navíc v materiálu tvořil cestičky, kterými procházel s menším odporem. Při ručním testování jsem cítil, jak je první záběr (otáčka) do materiálu mnohem těžší, než byly všechny ostatní záběry. Tento koncept testu dopadl velice špatně.

6.2 Druhý návrh - Válec se žiletkama

Vytisknutý koncept k testování, viz obrázek 44. Testování bylo provedeno 500 ot. / cykly. Výsledek testovaného konceptu má být vliv abrazivity na povrchu vzorku. Hodnotil jsem vizuální stránku vzorků, jejich výsledky jsou na obrázcích níže, společně s nepoužitou žiletkou na obrázku 50. Obrázky jsem ztmavil pro snazší pozorování. Porovnávání hmotnosti žiletek před a po testu jsem neprováděl.



Obr. 50: Ostří testované žiletky před testem



Obr. 51: Ostří žiletky testované s RDF

Na žiletce po testování materiálu RDF se vytvořilo pár malinkých oděrek v ostří.



Obr. 52: Ostří žiletky testované s kaly z odpadní vod

Na žiletce po testování s kaly z odpadních vod se vytvořilo pár malinkých oděrek v ostří stejně, jako tomu bylo u materiálu RDF. Avšak bylo možné pozorovat nepatrně větší množství.



Obr. 53: Ostří žiletky testované s pískem

Ze všech testovaných vzorků měl vzorek testovaný s pískem znatelně nejvíce oděrek.

Závěr

V tomto testu se opotřebení projevilo oděrkami v ostří. Povrch ostří zůstal lesklý, takže nezměněný z původního stavu. Přestože se podle množství oděrek v ostří dalo zjistit, který materiál je abrazivnější, tak neměl tento test dostatečně vypovídající potenciál k tvorbě zamýšlené databáze.

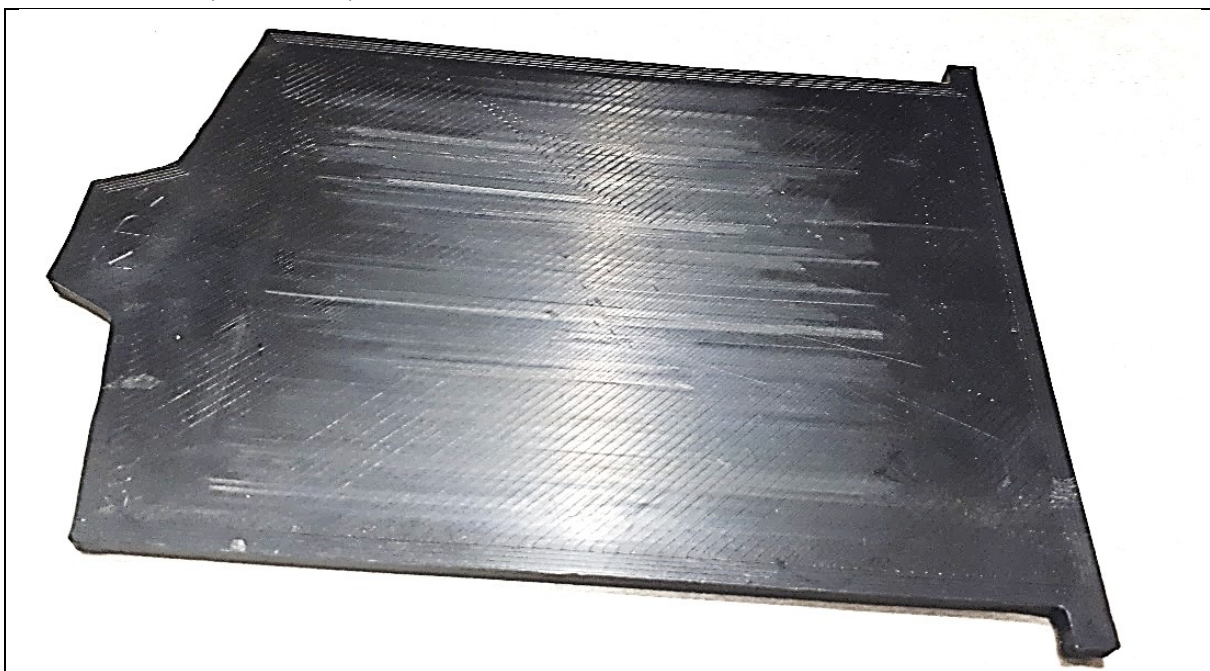
6.3 Třetí návrh - Nádoba s posuvným vzorkem

Vytisknutý koncept k testování, viz obrázek 45. Testování bylo provedeno 250 cykly / posuvy ze spodní úvratě do horní a zpět do původní polohy. Výsledek testovaného konceptu má být vliv abrazivity na povrchu vzorku. Na dotyk byla plocha vzorku hladká. Viditelné šikmé pruhy bylo možné cítit pouze přejetím nehte. Testovaná plocha byla spodní strana tisknutého dílu. Jedná se o základnu pro tisk. Ta byla vytvořena na skleněné podložce v tiskárně určené k tisku a při teplotě 80°C se vytvořil velice hladký povrch. Hodnotil jsem vizuální stránku vzorků, jejich výsledky jsou na obrázcích níže, společně s nepoužitým vzorkem na obrázku 54. Porovnávání hmotnosti vzorků před a po testu jsem neprováděl.

6.3.1 Fotky testovaných vzorků



Obr. 54: Testovací plocha vzorku před testem



Obr. 55: Testovací plocha otestovaná s RDF

Na vzorku po testování materiálu RDF se vytvořilo mnoho povrchových rýh, viz obrázek 55. Avšak pouze jediná rýha byla hlubšího charakteru, ze zbytku rýh nešla pozorovat ztelnější abraze.



Obr. 56: Testovací plocha otestovaná s kaly

Na vzorku po testování kalů z odpadních vod se vytvořilo ztelně méně povrchových rýh, než tomu bylo u předchozího vzorku s RDF, viz obrázek 56. Na vzorku se vyskytovalo pár rýh hlubšího charakteru, ze zbytku rýh nešla pozorovat ztelnější abraze. Z toho mi vyplynulo, že kaly, přestože jsou abrazivnější materiál, tak u nich záleží na místě kontaktu se vzorkem. Jelikož kaly opsaují abrazivní částice, tak byl pravděpodobně na vzorku pozorován pouze vliv těchto částic.

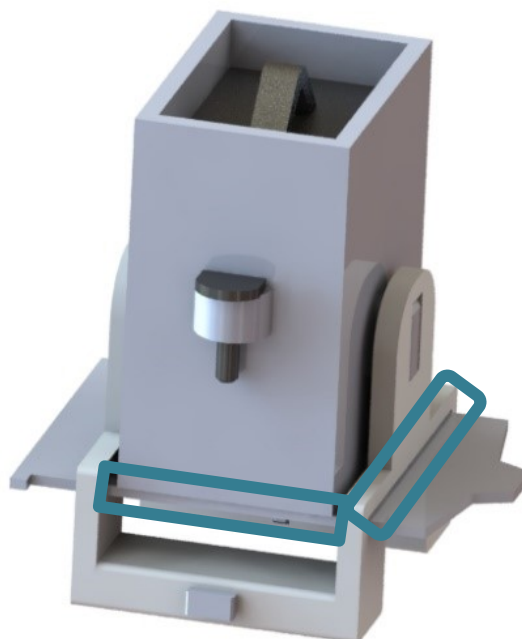


Obr. 57: Testovací plocha otestovaná s pískem

Na vzorku po testování písku se vytvořilo nejvíce povrchových rýh ze všech vzorků, viz obrázek 57. Tento enormní nárůst projevu abrazivity byl způsobený vnikáním zrn písku mezi spodní stěny nádoby. To mělo za následek zvýšení působení tlaku od písku na testovaný vzorek. Opořebení na vzorku se nacházelo převážně v místech, kde se při testování nacházeli stěny nádoby. Tento test tedy

nebyl srovnatelný s předchozími návrhy. Bylo z něho však možné vyvodit, že při vyšším normálovém tlaku, je možné dosáhnout uspokojivého vizuálního výsledku opotřebení na plastovém vzorku.

Místa úniku při testování písku



Obr. 58: Místa úniku písku při testování

Závěr

V tomto testu se opotřebení projevilo rýhami na lesklém, hladkém povrchu posuvných vzorků. Povrch všech vzorků zůstal lesklý a hladký, ale s pozorovatelnými změnami z důvodu opotřebení. Z vizuálního hlediska se dalo určit, který materiál byl nejabrazivnější, nicméně toto určení je na hraně. Rozdíl mezi RDF a kaly z odpadních vod není výrazný a test s pískem byl ovlivněn vyššími tlaky. Avšak za použití dodatečného tlaku na materiál při testování v tomto konceptu, budou podmínky testu připomínat více právě test s pískem. Proto jsem tento koncept považoval za nejvhodnější z otestovaných variant.

6.4 Závěr testování koceptů

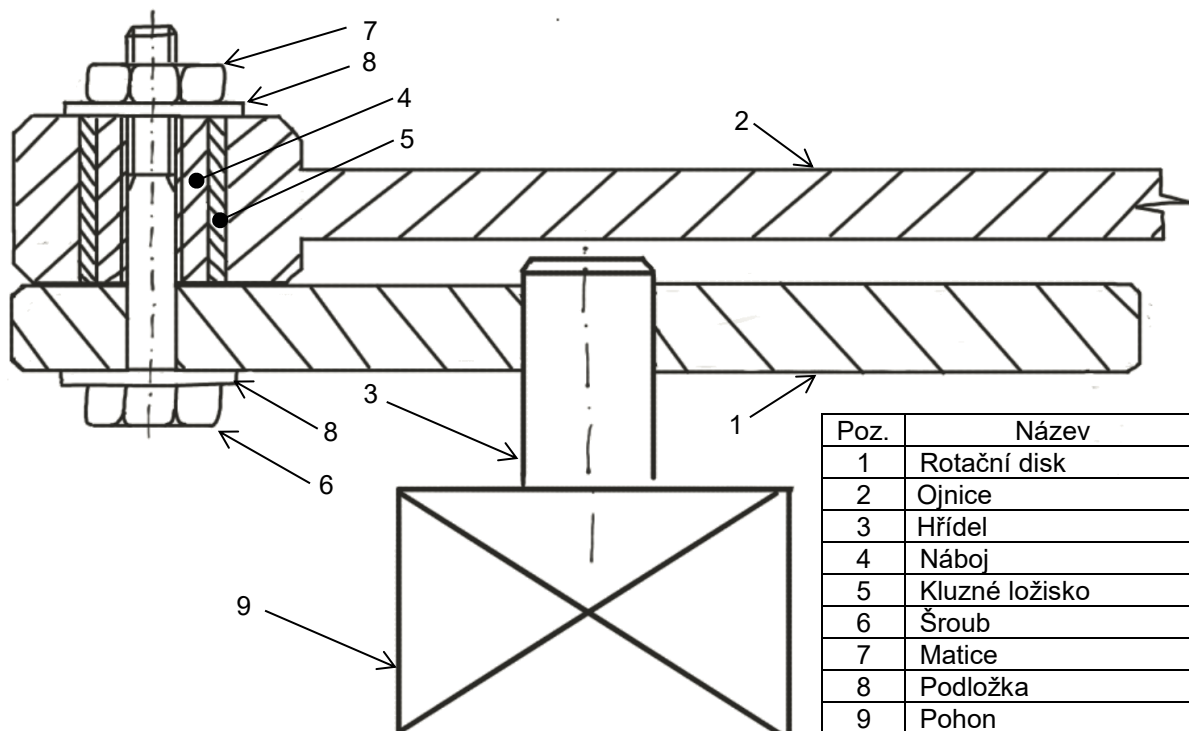
Závěrem je stanovení směru dalšího vývoje. Vliv opotřebení byl nejlépe pozorovatelný, a to i pouhým okem na variantě konceptu s posuvným vzorkem. Společně s vedoucím vývojového oddělení jsme se rozhodli pokračovat ve vývoji tohoto konceptu měření abrazivity.

Testování pomocí lopatek se ukázalo jako nejméně efektivní. Testování pomocí žiletek dopadlo o něco lépe než testování pomocí lopatek. Testování posuvným vzorkem se ukázalo ze všech tří metod nejefektivnější.

7 Náčrt prototypu

Náčrty jsem prováděl na iPadu v programu Paper.

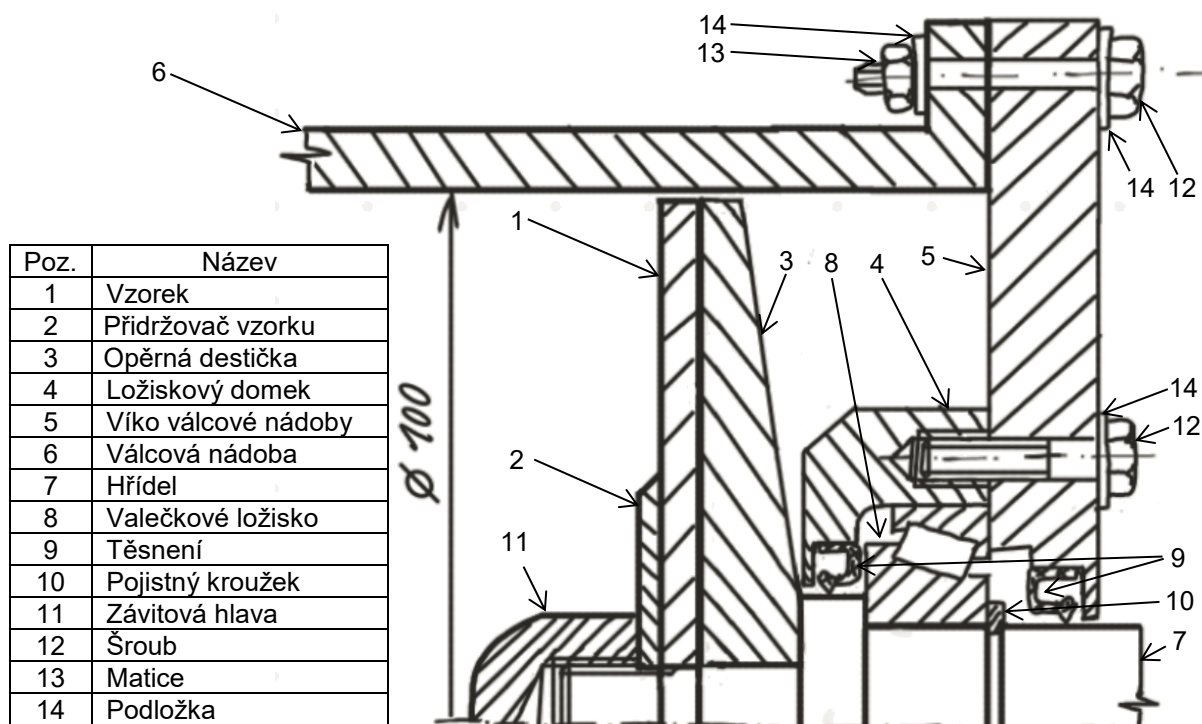
Jako první jsem vytvořil náčrt návrhu pohonné části konceptu s posuvným vzorkem. Náčrt je na obrázku 59. V náčrtu jsem uvažoval pohon prostřednictvím elektromotoru s převodovkou. Toto řešení by vyžadovalo krytování na všechny pohybující se části. Z pravé části náčrtu by se vyskytovala nádoba na materiál, pod kterým by se pohyboval posuvný vzorek.



Obr. 59: Náčrt návrhu pohonné části konceptu s posuvným vzorkem

Při tomto návrhu jsem si uvědomil, že jsem neměl dořešenou velikost zařízení, která měla být co možná nejmenší, kvůli potřebě cestovat se zařízením k zákazníkům po celém světě. Přišlo mi, že rotační disk společně s ojnicí zabírá zbytečně moc místa a přidává zařízení zbytečnou hmotnost.

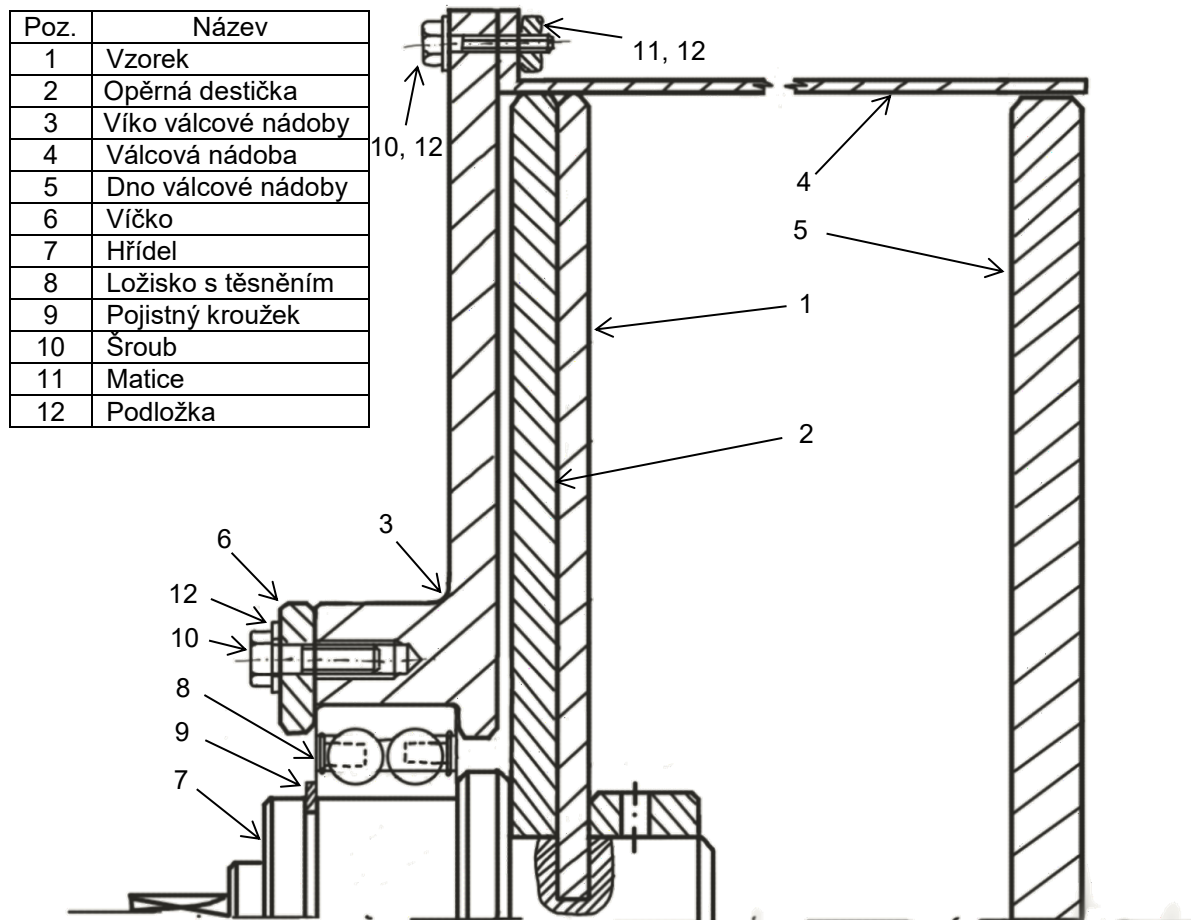
Až po promyšlení nových možností jsem vymyslel návrh konceptu válce s rotujícím víkem, který jsem konzultoval s inženýrem z firmy Schenck Process. Tento nový koncept jsem považoval za funkčně velice blízky konceptu s pohyblivým vzorkem. Proto jsem tedy neprováděl žádné zkoušky a pokračoval ve vývoji tímto směrem. Ukázka prvního náčrtu tohoto konceptu je na obrázku 60.



Obr. 60: Původní náčrt návrhu válce s rotujícím víkem

Po donavržení náčrtu z konceptu na obrázku 60, jsem tento náčrt konzultoval s vedoucím vývojového oddělení Schenck Process. Z této konzultace mi vyšlo, jaké úpravy mám provést.

Následně jsem vytvořil nový přetvořený náčrt návrhu zařízení s rotujícím víkem, viz obrázek 61. Po vytvoření tohoto náčrtu jsem tuto část vývoje považoval za ukončenou a přesunul jsem se k návrhu prototypu v CAD programu SolidWorks.



Obr. 61: Přetvořený náčrt návrhu válce s rotujícím víkem

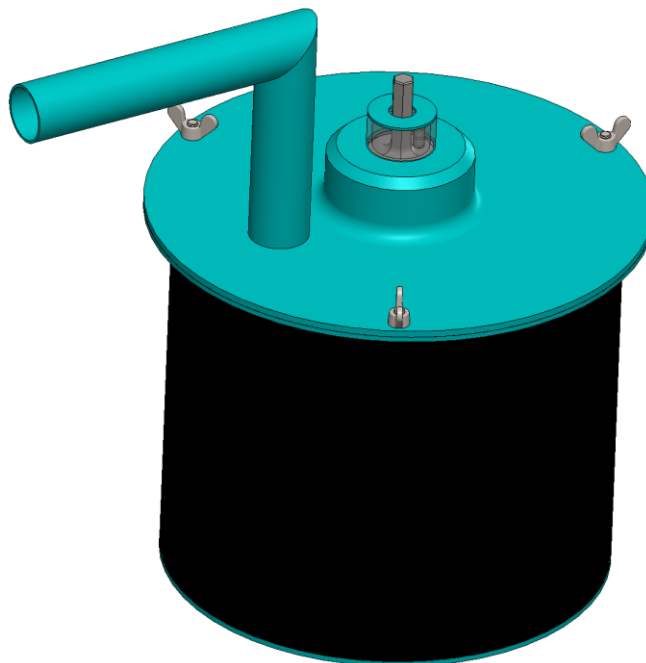
8 Návrh prototypu

Po dokončení náčrtů jsem navrhl prototyp sestavy v CAD programu SolidWorks.

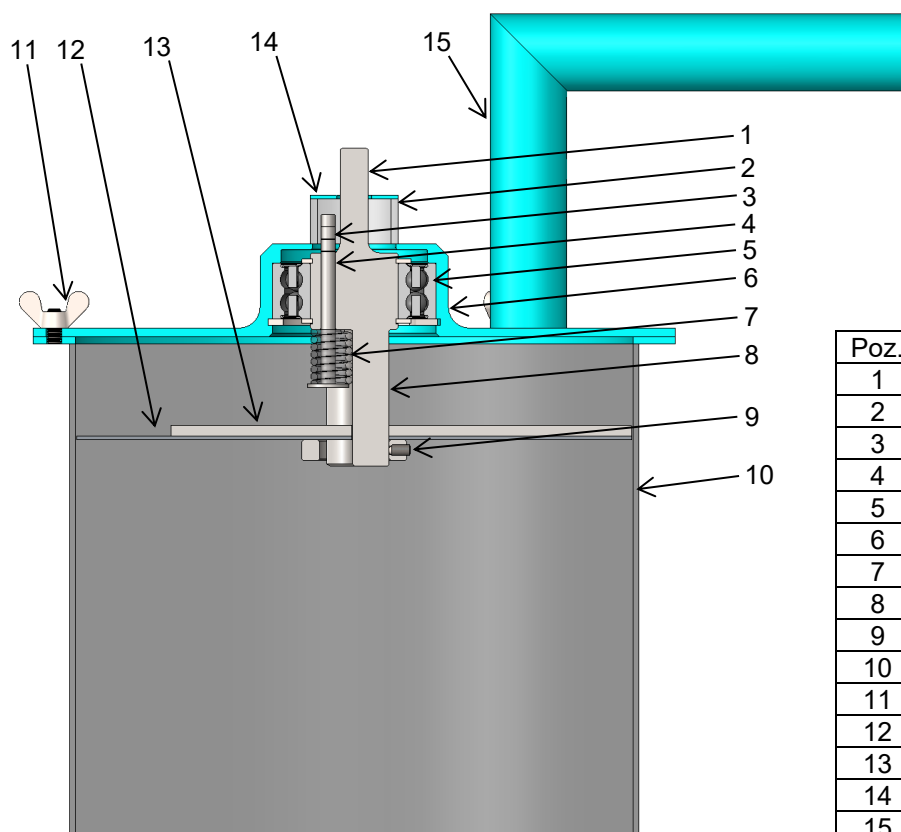
8.1 Funkce zařízení

Zařízení slouží primárně ke stanovení abrazivity testovaného sypkého materiálu pomocí opotřebení hliníkového vzorku. Po otestování lze účinek abraze vyhodnotit opticky nebo hmotnostně.

Ručním doplňováním materiálu a následným přitlačováním víka nádoby se nastaví zatížení působící na vzorek. To se zkontroluje na ukazateli zatížení viditelného skrze transparentní PVC trubku. Ukazatel zatížení funguje na principu stlačení pružiny. Po nastavení se provede test opotřebení. Jako pohon slouží aku vrtačka uchycená za šestihran na vrchu zařízení. Tím je poháněna hřídel, na které je uchycený rotační hliníkový vzorek. Pro snadnou obsluhu je na víku nádoby přivařená rukojeť. Ta by měla usnadnit, jak nastavování zatížení, tak i nošení samotného zařízení.



Obr. 62: Návrh prototypu



Obr. 63: Návrh prototypu v řezu

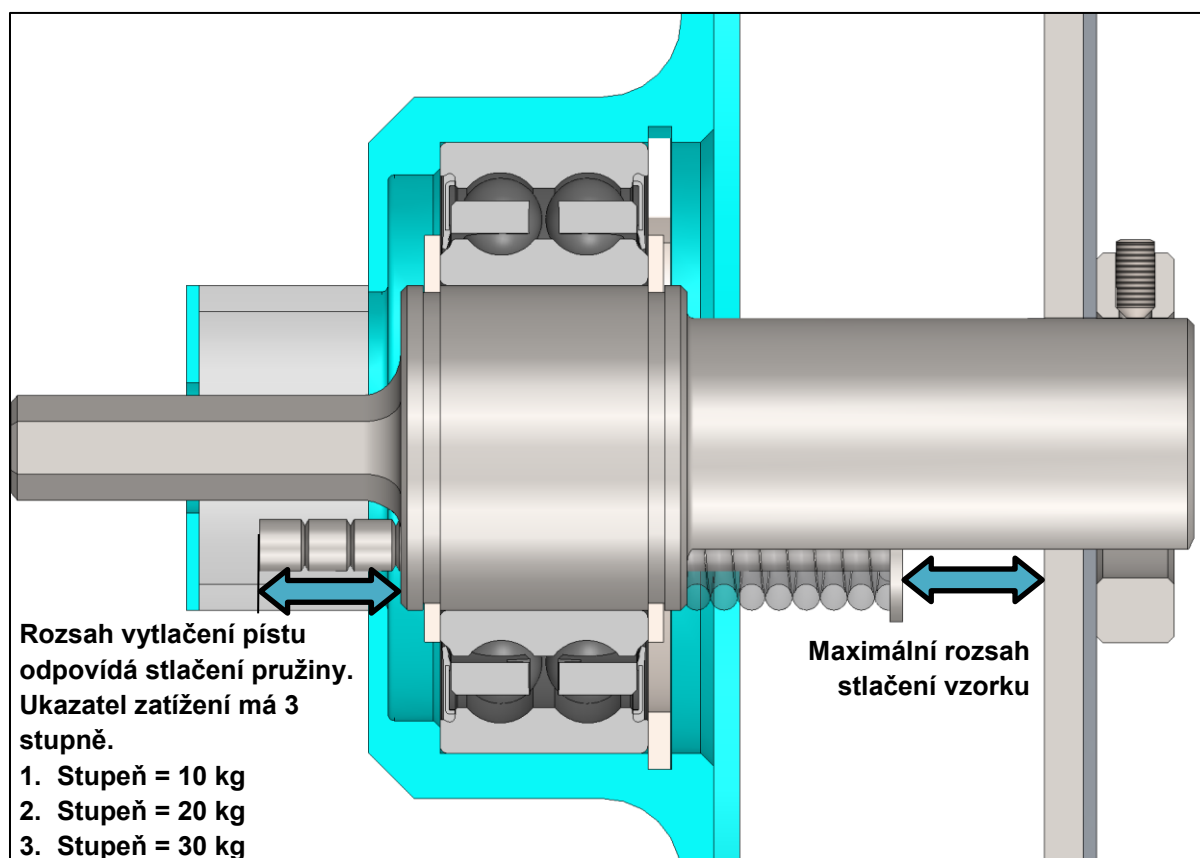
Poz.	Název
1	Uchycení aku vrtačky
2	Průhledná trubka
3	Ukazatel zatížení
4	Píst
5	Ložisko
6	Víko nádoby
7	Pružina
8	Hřídel
9	Upínání vzorku
10	Válcová nádoba
11	Křídlová matice M4
12	Hliníkový vzorek
13	Opěrná destička
14	Ochranné víčko
15	Rukojeť

8.2 Návrh zatížení vzorku

Při testování materiálu bude vhodné mít možnost tento materiál i něčím zatížit. Proto jsem se rozhodnul na testovaný materiál vytvořit určitou zátěž. Za podmínky, že zařízení není určeno do laboratoře, není ani vhodné zaznamenávat zátěž tenzometrem. V takovém případě by se dala zátěž plynule regulovat posuvem pomocí stahování matice na víku zařízení nebo použitím závaží. Od svého původního návrhu zatížit materiál závažími jsem opustil při uvědomění si skutečnosti, že zařízení budou technici vozit k zákazníkům a budou ho sebou nosit na pracoviště.

Dalším návrhem se tedy stala pružina, která je schopna vytvořit zatížení neúměrné své hmotnosti. V úvahu připadala jak tažná, tak i tlačná pružina. Po zvážení vlastních úvah jsem se rozhodl pro tlačnou pružinu. Při podmínce, že bude v zařízení pružina, jsem si kladl otázku, jak bude obsluha schopna nastavit správné stlačení pružiny. Jako jediné smysluplné řešení mi přišlo měření pístu nebo výčnělku, který by se pohyboval se stlačení pružiny. Nejdříve jsem uvažoval tři rozložené pružiny mezi vzorkem a diskem držící tyto pružiny. Tento disk by se opíral o hřídel. Tím bych zajistil přenos sil k ložisku. Při tomto řešení jsem nezůstal z důvodu komplikace stanovení míry stlačení / zatížení. Hlavním problémem byla viditelnost ukazatele zatížení.

Finálním řešením bylo stlačování pružiny, pístem opírajícího se o testovaný hliníkový vzorek. Stanovení stlačení pružiny jsem tedy navrhl přes vytvořenou stupnici na pístu procházejícím pružinou uloženou ve hřídeli. Tuto stupnici na konci pístu jsem nazval ukazatel zatížení. Tato část pístu se vysouvá z hřídele kousek od šestihranu na hřídeli. Při provozu zařízení se tento ukazatel točí společně s hřídelí, proto jsem ho zakryl přilepenou průhlednou PVC trubku o průměru 25 mm.



Obr. 64: Zatížení vzorku

Z tohoto řešení by mělo být možné vyčíst, jaké přibližné zatížení na vzorek působí při dostatečně sníženém riziku z poranění končetin a zároveň při zachování celistvosti válcové nádoby se sytkým materiálem. Zatížení, by bylo při testování zaznamenáváno na testovaných vzorcích, např. vyritím do vzorku nebo poznamenáním nesmazatelnou fixou.

8.2.1 Návrh velikosti zatížení vzorku

Velikost síly se dá přepočítat na tlak působící na vzorek. Podle toho lze napodobit tlak uvnitř násypky, zásobníků a podobných skladovacích zařízení. Pro inspiraci vhodného zatížení pro obsluhu jsem použil stlačení osobní váhy oběma rukama. Z toho vyplynulo, že zatížení do 40 kg je pro obsluhu zařízení přijatelné. Tímto návrhem jsem chtěl docílit snadné manipulace při ručním nastavování tlaku.

Použití zařízení jsem uvažoval, jako naplnění válcové nádoby materiálem a po stlačení materiálu víkem nádoby se zkontroluje vyvinutá zátěž na vzorek. Kontrola by se prováděla podle ukazatele zatížení, což je část pístu, která je vytlačena ven z hřídele na vršku zařízení do průhledné PVC trubky. Podle tuhosti pružiny je možné definovat, jaké zatížení působí na vzorek. Kalibrace tohoto měřicího mechanismu je nezbytná. Orientačně se dají výpočtem z rovnice tuhosti pružiny c [$N \cdot mm^{-1}$] se dají definovat délky stlačení pružiny s_n [mm] při odpovídající síle, viz rovnice (2). **Výrobce uvádí, že tuhost i délka mají značné tolerance, proto se stupnice na pístu nechá vytvořit až kalibrací.**

$$c = \frac{F_n}{s_n} = [N \cdot mm^{-1}] \quad (2)$$

F_n – Síla působící na pružinu [N]

s_n – Deformace pružiny (úměrná síle vyvinuté na pružinu) [mm]

Jako maximální uvažované zatížení jsem zvolil tlak od sloupce materiálu 4 m na ploše 1 m² a o hustotě 400 kg/m³. Tento návrh má napodobit maximální možné zatížení vytvořené materiálem v násypkách na funkční plochy násypky. Výsledek uvažovaného maximálního zatížení v násypce je ve výpočtu (3). Toto zatížení jsem výpočtem převedl na plochu vzorku. Zatížení působící na vzorek o průměru 159 mm, který jsem navrhl, podle válcové nádoby o průměru 160 mm se rovná **síle působící na pružinu 300 N (30,5 kg)**, viz výpočet (4).

Maximální zatížení v uvažované násypce p_{max}

$$p_{max} = \frac{F}{S} = \frac{m \cdot g}{S} = \frac{\rho \cdot h \cdot g}{S} = \frac{400 \cdot 4 \cdot 9,81}{1} \cong 15,7 \text{ kPa} \quad (3)$$

p_{max} – Maximální zatížení v uvažované násypce [Pa]

F – Síla [N]

S – Plocha [m²]

m – Hmotnost [kg]

g – Gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-1}$]

h – Výška sloupce materiálu [m]

ρ – Hustota sypaného materiálu [kg/m^3]

Působící axiální síla na pružinu F_A

$$p = \frac{F}{S} \rightarrow F_A = p_{max} \cdot S_{vz} = 15\,700 \cdot 0,02 \cong 300 \text{ N} \cong 30,5 \text{ kg} \quad (4)$$

F_A – Axiální síla působící na pružinu [N]

p_{max} – Maximální zatížení v uvažované násypce [Pa]

S_{vz} – Plocha vzorku [m²]

Plocha vzorku S_{vz}

$$S_{vz} = \frac{\pi \cdot D_{vz}^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_{kr}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,159^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0,030^2}{4} = 19\,855 \text{ mm}^2 \cong 0,02 \text{ m}^2 \quad (5)$$

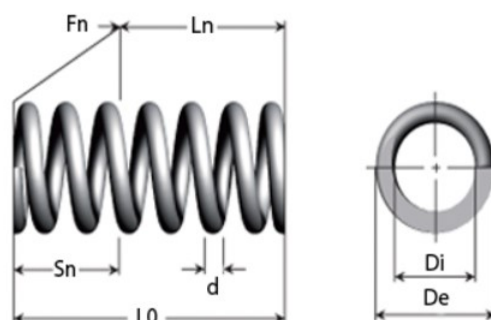
D_{vz} – Vnější průměr vzorku = 159 [mm]

D_{kr} – Vnější průměr upínacího kroužku = 30 [mm]

8.2.2 Výběr pružiny

Pružinu jsem vybíral až z druhého internetového obchodu a to www.sodemann-pruziny.cz. Tento internetový obchod mi nabídl správnou kombinaci vlastností v podobě průměru pružiny, délky a tuhosti. Tyto tři veličiny hrály zásadní roli při výběru pružiny. Pružinu jsem uložil do vyvrtané díry v hřídeli a skrz ni jsem navrhl protáhnout posuvný píst, který se opírá o jeden konec pružiny. Tento píst se zároveň opírá přímo o opěrnou destičku se vzorkem, atak dochází k přímému stlačení vlivem zatížení od materiálu ve válcové nádobě. Tím jsem zajistil, aby tento posuvný píst přesně kopíroval zdvih pružiny a informoval obsluhu o stlačení pružiny. Díky vytvořené stupnici na tomto pístu bude obsluha schopná číst zdvih v podobě zatížení v kg.

d	– Průměr drátu [mm]	= 2
De	– Vnější průměr [mm]	= 12
Di	– Vnitřní průměr [mm]	= 8
L0	– Délka bez zatížení [mm]	= 26,5
Ln	– Max. délka při zatížení [mm]	= 15,6
Sn	– Maximální zdvih [mm]	= 10,9
Fn	– Maximální zatížení při Ln [N]	= 317,7
c	– Tuhost pružiny [N·mm ⁻¹]	= 29,71



Obr. 65: Vybraná pružina [29]

8.2.3 Kontrola pružiny

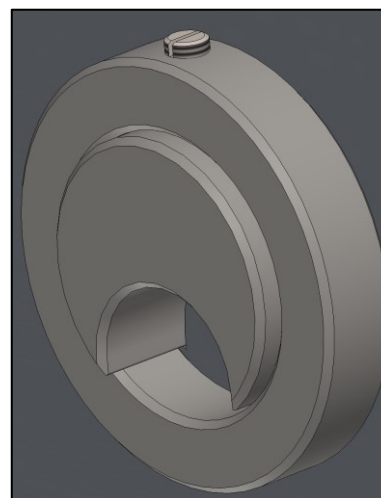
Pružinu jsem ověřil i výpočtem v programu MitCalc. Na první pohled lze vidět, že hodnota bezpečnosti je nízká - 0,869. Jelikož prodejce udává max. zatížení 317,7 N, rozhodl jsem se ji do svého zařízení zvolit. Jelikož bude pružina používána jen k testování, tak četnost jejího použití nebude velká.

7.0 <input checked="" type="checkbox"/> Kontrolní výpočet pružiny.			
7.1	Načtení vstupních údajů z hlavního výpočtu	Načtení	
7.2	Parametry pracovního cyklu		
7.3	Maximální pracovní zatížení	F ₈	300,00 [N]
7.4	Minimální pracovní zatížení	F ₁	93,3 [N]
7.5	Pracovní zdvih pružiny	H	10,00 [mm]
7.6	Pevnostní kontrola pružiny		
7.7	Střední průměr pružiny	D	10,00 [mm]
7.8	Doporučené meze průměru drátu	d _{min} / d _{max}	2,25 2,50 [mm]
7.9	Průměr drátu / z tabulky	d	2,00 6 [mm]
7.10	Vnější / vnitřní průměr pružiny	De / Di	12 8 [mm]
7.11	Poměr vinutí	i	5,00
7.12	Mezní dovolené napětí v krutu	τ _D	830 [MPa]
7.13	Korigované napětí pružiny v plně zatíženém stavu	τ _{8c}	954,9 [MPa]
7.14	Míra bezpečnosti		0,869
7.15	Stabilita provedení pružiny		
7.16	Doporučený minimální počet činných závitů	n _{min}	5,17
7.17	Počet činných závitů	n	7,50
7.18	Teoretická mezní délka pružiny	L ₉	19 [mm]
7.19	Doporučené meze volné délky	L _{0min} / L _{0max}	36,61 49,00 [mm]
7.20	Volná délka pružiny	L ₀	26,50 [mm]
7.21	Doporučené meze rozteče mezi závity	t _{min} / t _{max}	3 6 [mm]
7.22	Rozteč mezi závity volné pružiny	t	3,00 [mm]
7.23	Minimální mezní zkušební délka pružiny	L _{minF}	22,1 [mm]
7.24	Délka pružiny při min. / max. pracovním zatížení	L ₁ / L ₈	21,99 11,99 [mm]
7.25	Stlačení pružiny při min. / max. pracovním zatížení	s ₁ / s ₈	4,51 14,51 [mm]
7.26	Dovolené / skutečné max. pracovní stlačení pružiny		100 54,77 [%]

Obr. 66: Kontrolní výpočet pružiny v programu MitCalc

8.2.4 Minimální zatížení pružiny

Pružina se při montáži i domontáži vzorku musí vždy trochu stlačit. To by se provádělo vzorkem / opěrnou destičkou a následně zajištěním nebo uvolněním upínacího kroužku, tak aby nedocházelo k volnému pohybu pružiny v díře hřídele anebo, aby se neuvolnil a zbytečně nevypadl některý z dílů zařízení. Pružina by měla být vždy zajištěna upínacím kroužkem za pomoci stavěcího šroubu M3 uvnitř upínacího kroužku.



Obr. 67: Upínací kroužek na hřídeli

8.2.5 Stupnice zatížení

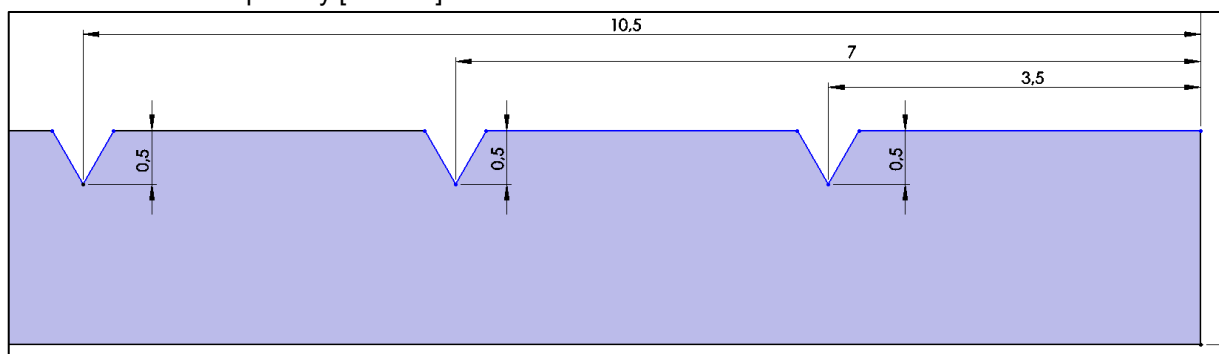
Podle rovnice (2) jsem navrhl ukázkou hodnot stupnice (6,7 a 8), která se vytvoří na výsuvné části pístu, aby obsluha byla schopná snadno určit, jakým zatížením v kg na vzorek působí. Pro smysluplnou stupnici jsem se rozhodl pro stupně označující hodnotou 30, 20 a 10 kg. Při nestlačené pružině je píst zarovnaný s vrchním bokem hřídele.

$$c = \frac{F_n}{s_n} \rightarrow s_{n30} = \frac{F_{30}}{c} = \frac{294,2}{29,71} = 10,61 \text{ mm} \cong 10,5 \text{ mm} \quad (6)$$

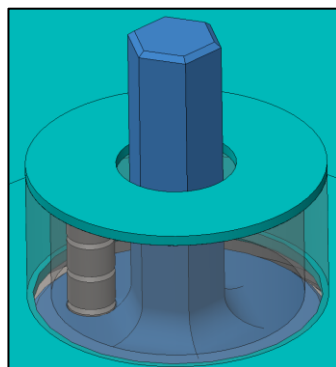
$$s_{n20} = \frac{F_{20}}{c} = \frac{196,13}{29,71} = 7,08 \text{ mm} \cong 7 \text{ mm} \quad (7)$$

$$s_{n10} = \frac{F_{10}}{c} = \frac{98,07}{29,71} = 3,54 \text{ mm} \cong 3,5 \text{ mm} \quad (8)$$

- F_{30} – Síla působící na pružinu od zatížení 30 kg
- F_{20} – Síla působící na pružinu od zatížení 20 kg
- F_{10} – Síla působící na pružinu od zatížení 10 kg
- s_{nn} – Deformace pružiny zatížené 10, 20 a 30 kg [mm]
- c – Tuhost pružiny [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$]



Obr. 68: Ukázkou stupnice na pístu



Obr. 69: Ukazatel zatížení zakrytý transparentní PVC trubkou

8.3 Vzorek

Vzorek slouží k projevu abraze na jeho povrchu, v místě kontaktu se sypkým materiálem. Vzorek jsem navrhl 159 mm v průměru, z 1 mm tlustého hliníkového plechu. Vzorek bude zatížen navrhovaným zatížením 300N a proto jsem ho podepřel plechovou opěrnou destičkou o tloušťce 4 mm. Návrh opěrné destičky jsem provedl za použití MKP k vyvážení funkce a hmotnosti dílu.

8.3.1 Materiál

Hliník [30]

V prostředí s nebezpečím výbuchu, které se v zamýšleném místě použití zařízení uvažuje, je známo, že hliníkový prach je velmi výbušný, avšak při aplikaci vzorku uvnitř navrhovaného prototypu nehrozí vytvoření výbušné atmosféry.

Z databáze materiálu v programu SolidWorks jsem zvolil hliník Al 99,7. Jedná se o nelegovaný hliník s maximálním podílem nečistot 0,5%. Tento materiál lze zakoupit v podobě plechu, a proto by z něho bylo možné vyrobít i vzorek pro testování. Nevytvrzelý plech má mez kluzu mezi 60 až 90 MPa a mez skluzu okolo 15 Mpa. Z důvodu malé pevnosti se mi tento materiál zamlouval jako opotřebitelný prvek při zkoušce abraze.

Plast

Plastový vzorek je až druhá možnost. Pokud prototyp s hliníkem nebude fungovat, dalo by se uvažovat o možnosti tisknutí vzorků. 3D tisk vytváří malé nerovnosti na povrchu, někdy i znatelně deformované tvary. Je tedy diskutabilní, jestli je tento materiál vhodný na vzorek.

Jelikož by se hliník pod zátěží deformoval, rozhodl jsem se ho podepřít opěrnou destičkou z plechu S235JR. Vedoucí vývojového oddělení z firmy Schenck Process s tímto návrhem souhlasil.

8.3.2 Přenos krouticího momentu

Aby se mohl výkon z Aku vrtačky přenést z hřídele na vzorek je nutné zajistit dostatečně pevný spoj mezi vzorkem a hřídelí. Toho jsem docílil návrhem jazýčku, který pasuje do díry v hřídeli, kde je uložena pružina.

8.3.3 Uložení vzorku

Zajištění vzorku na hřídeli z jedné strany jsem navrhl vypálenou opěrnou destičkou o tloušťce 3 mm, která je přitlačena pružinou a dosedá na hřídele stejně jako vzorek. Má taky stejný jazýček pro přenos krouticího momentu. Opěrná destička slouží jako podpora vzorku proti deformaci při testování.

Zajištění vzorku na hřídeli z druhé strany jsem navrhl jednoduchým kroužkem s vyvrtanou závitovou dírou pro pojistný červík. Kroužek s červíkem se bude vyndávat a nasazovat pokaždé při vyndávání a usazování vzorku do zařízení.



Obr. 70: Upínací kroužek

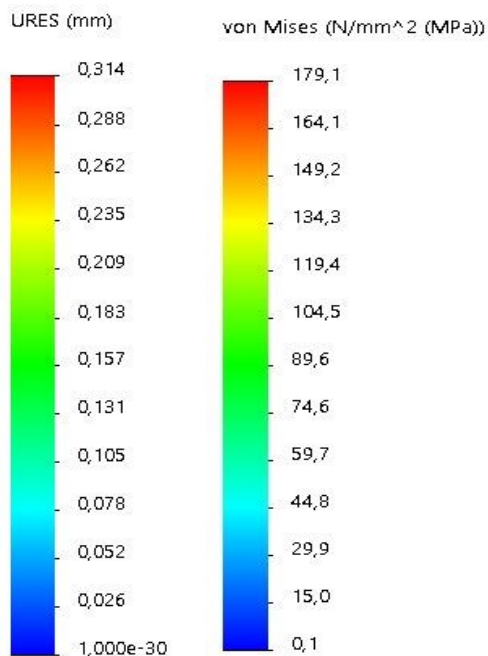
8.3.4 Statická analýza vzorku s opěrnou destičkou

Ke stanovení deformace a stavu pevnosti jsem použil MKP metodu. Pro zjednodušení jsem vytvořil 0,01mm vysokou plochu s průměrem stejným jako má pružina v místě dotyku pružiny. Na toto místo jsem zavedl sílu od pružiny 300N. Dále jsem na plochu jazýčku umístil pevnou vazbu. Ze strany vzorku jsem zavedl působení tlakové síly 15 700 Pa, viz kapitola Návrh zatížení. Výslednou analýzu, kterou jsem uvedl níže, byla šestá analýza v pořadí. Od začátku bylo jasné, že jsem měl tenké stěny a že v místě jazýčku budou vznikat tlakové špičky. Postupným navrhováním jsem se dostal k finálnímu

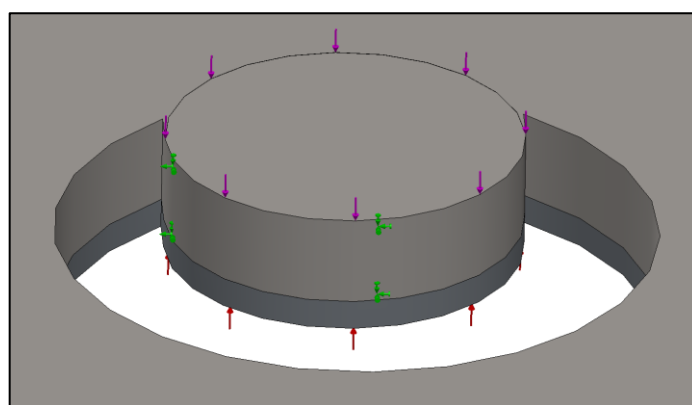
návrhu, kde jsem podle předchozích výsledků přesunul hmotu tak, abych docílil smysluplného rozložení hmoty. Předchozí výsledky analýz jsem vložil do přílohy č. 2.

Maximální deformace vyšla ve finálním provedení 0,314 mm. Dál už jsem tento návrh nesnižoval, pokud by to bylo nutné, tak by se prototyp ještě maličko upravil před samotnou výrobou.

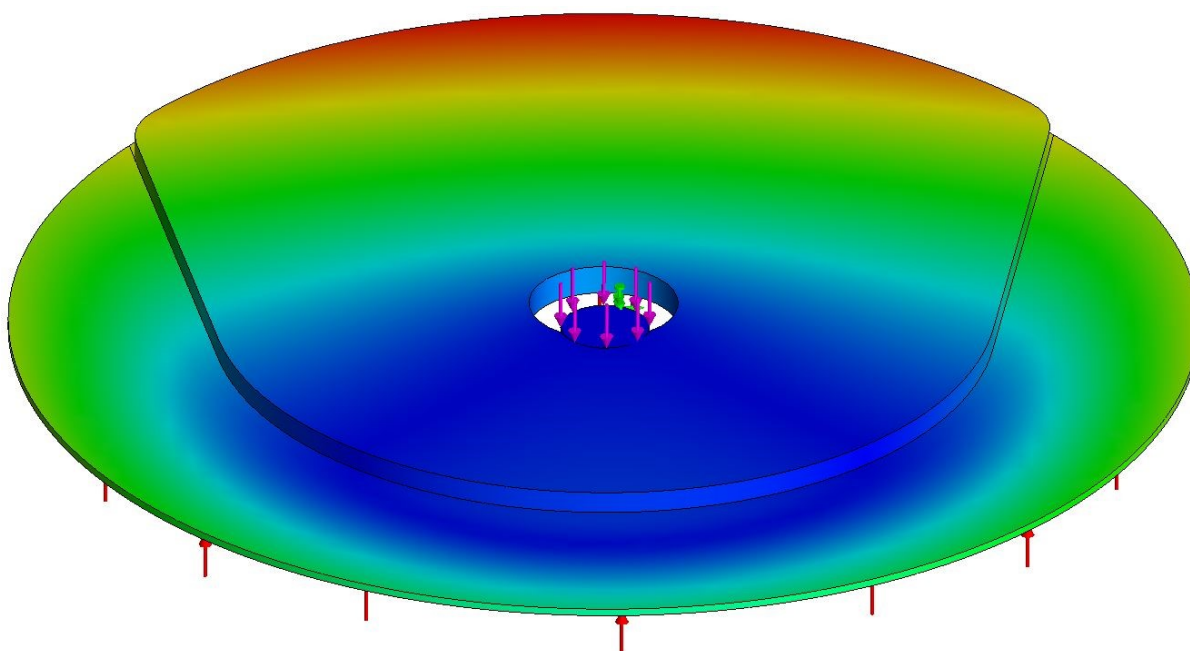
8.3.5 Výsledek statické analýzy



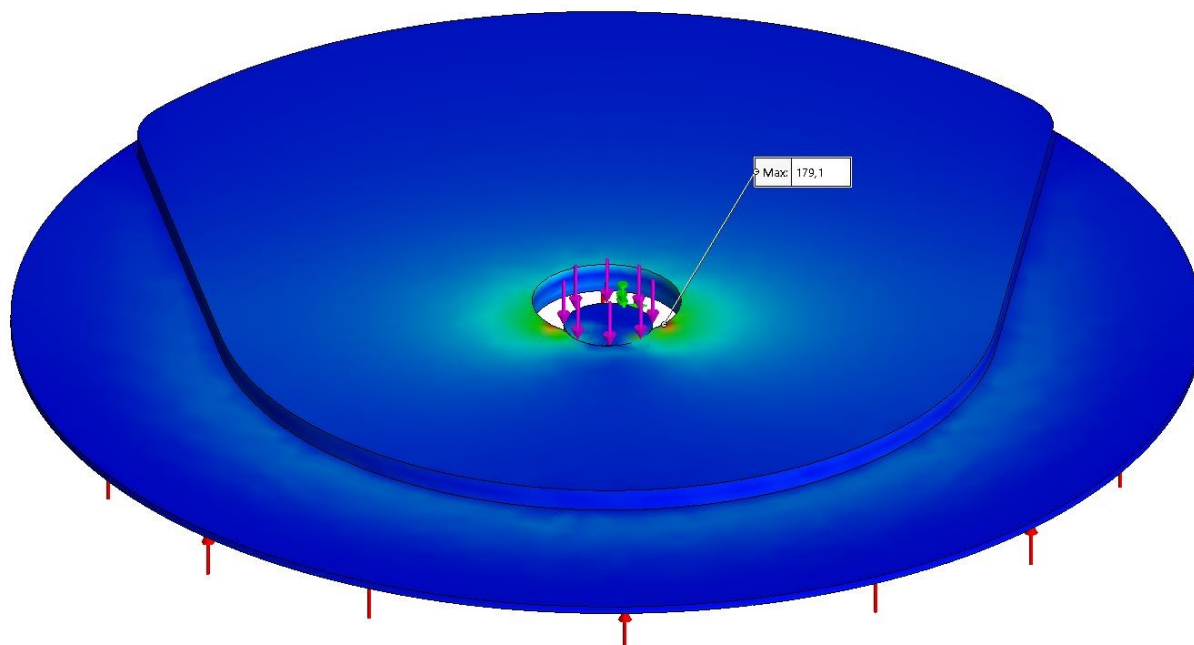
Obr. 71: Stupnice finálního MKP



Obr. 72: Zanesení sil a vazby na vzorek s opěrnou destičkou



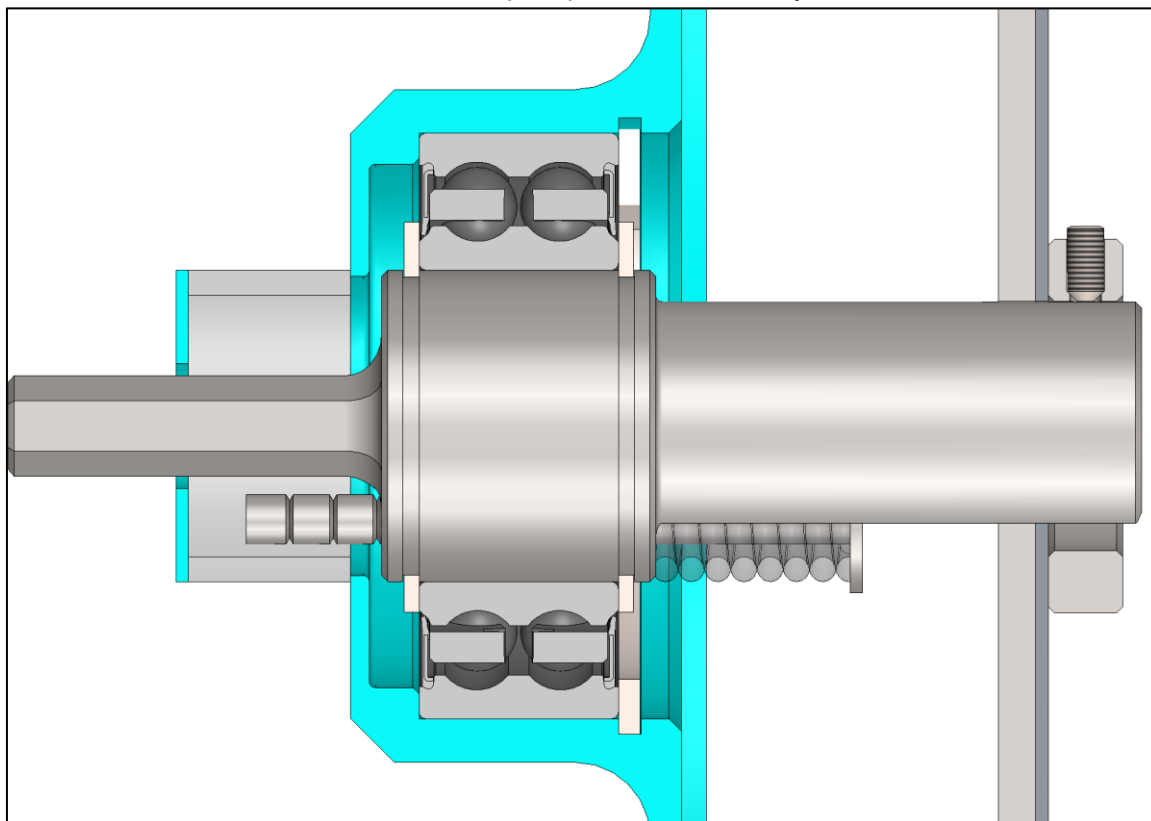
Obr. 73: Deformace



Obr. 74: Zatížení

8.4 Návrh ložiska

Do zařízení jsem zvolil kuličkové ložisko dvouřadé s kosoúhlým stykem oboustranně kryté plechem s vnitřním průměrem 25 mm. Ložisko je vyrobeno s doživotním mazáním, nebude tedy nutné ho domazávat. Zvolením ložiska s oboustranným těsněním jsem se v návrhu zbavil dvou těsnících kroužků. To mělo za následek znatelné zmenšení ložiskového domku a tím i celého přitlačného víka zařízení. Ložisko do zařízení jsem zvolil na základě konzultace s vedoucím vývojového oddělení v Schenck Process. Ložisko jsem zvolil předimenzované z důvodu nutnosti místa pro píst v hřídeli v kombinaci s velikostí šestihranu na hřídeli pro upnutí do aku vrtačky, viz obrázek 75.



Obr. 75: Návrh ložiska zařízení

Axiální síla působící na ložisko F_L

$$F_L = F_{kr,hř} + F_A = (p_{max} \cdot S_{vz,hř}) + F_A = (15\,700 \cdot 0,0007) + 300 \cong 311\,N \cong 31,6\,kg \quad (9)$$

F_L – Axiální síla působící na ložisko [N]

$F_{kr,hř}$ – Axiální síla působící na upínací kroužek a konec hřídele [N]

$S_{vz,hř}$ – Plocha upínacího kroužku s koncem hřídele [m²]

Plocha konce hřídele s upínacím kroužkem $S_{kr,hř}$

$$S_{kr,hř} = \frac{\pi \cdot D_{kr}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,030^2}{4} = 707\,mm^2 \cong 0,0007\,m^2 \quad (10)$$

D_{kr} – Vnější průměr upínacího kroužku na konci hřídele =30 [mm]

Pro zjednodušení výpočtu axiální síly působící na ložisko jsem počítal s plochou upínacího kroužku společně s koncem hřídele.

8.4.1 Kontrola ložiska v programu MitCalc

Kontrolní výpočet ložiska jsem provedl v programu MitCalc, viz obrázek 76. Hodnotu otáček jsem zvolil podle aku vrtaček z internetových obchodů. Prodejci uváděli hodnoty 2000ot·min⁻¹, jako maximální otáčky. Pro výpočet jsem chtěl zvolit nejhorší parametr, proto jsem tuto hodnotu použil při výpočtu. Axiální hodnotu jsem zvolil dle výpočtu a radiální sílu jsem zvolil jen jako malé číslo.

Obr. 76: Zatížení ložiska

Obr. 77: Parametry podobného ložiska

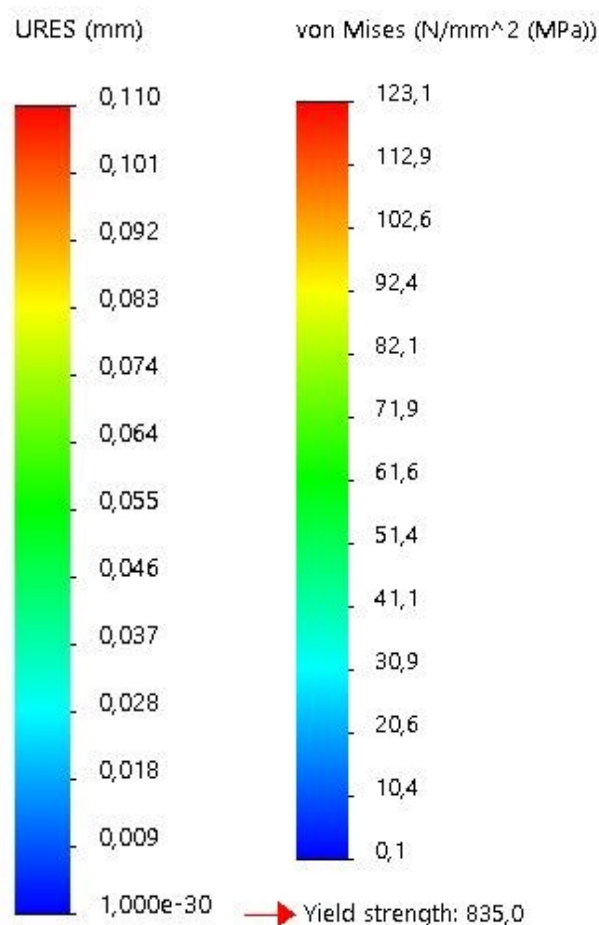
Dle tabulky parametrů na obrázku 77 je **základní životnost podobného ložiska L_{10h} přibližně jeden milion hodin**. Nicméně v návrhu průměru v části hřídele pro ložisko jsem jako minimální průměr zvolil 25 mm, a proto jsem tak extrémně předimenzované ložisko nezměnil.

8.5 Návrh ložiskového domku

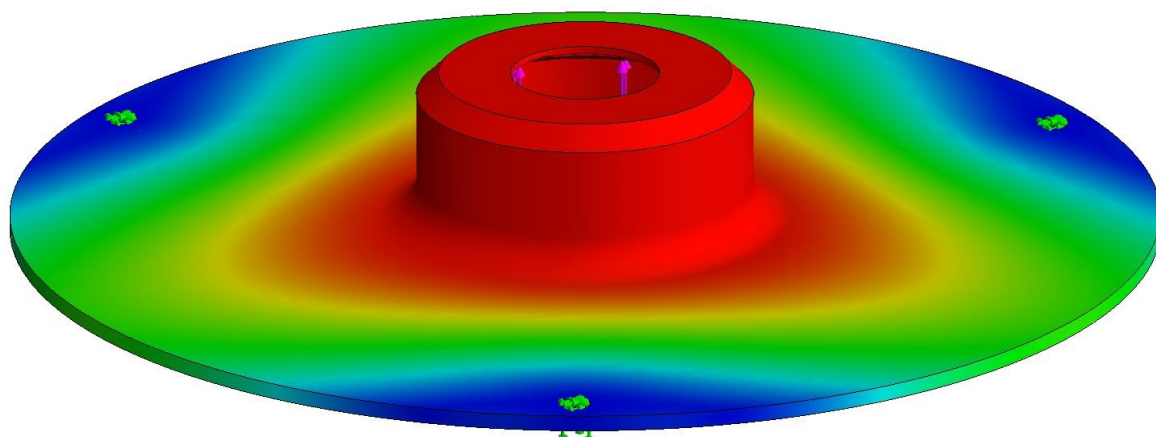
Ložiskový domek se nachází ve víku válcové nádoby. K provedení statické analýzy jsem zavedl tři pevné vazby na válcové plochy děr pro závitové na válcové nádobě. Sílu jsem zavedl na místo, kde se ložisko opírá o hranu uvnitř víka, a to o hodnotě 311 N. Víko jsem navrhl s nejmenší tloušťkou ploché kruhové stěny 1,5 mm. Tato tloušťka byla stejná jako tloušťka boční stěny válcové nádoby. Tento návrh mi však nevyhovoval ve statické analýze. **Zatížení přesáhlo mez skluzu** a max. hodnota deformace vyšla $>0,4$ mm. Výsledek jsem tedy ani nemohl považovat za odpovídající lineární analýze.

Největší vliv na výsledek měla tloušťka stěny kruhové plochy. Rozhodl jsem se tedy zvětšit tuto stěnu na 2,5 mm a část pro uložení ložiska jsem z 3 mm zvětšil na 3,5 mm. Zároveň jsem zvětšil rádius mezi kruhovou plochou víka a částí pro uložení ložiska ze 4 mm na 6 mm. **Poté mi max. zatížení vyšlo 123 MPa**. Tato hodnota je nižší než přednastavená mez skluzu materiálu v programu SolidWorks pro S235JR - 235 MPa. Bylo tedy možné považovat tuto analýzu za odpovídající lineární analýze. **Max. deformace vyšla přibližně 0,1 mm**. S těmito hodnotami jsem se už spokojil. Jelikož bude zařízení používáno krátký čas a ne moc často, považuji tento stav za dostatečně vyhovující.

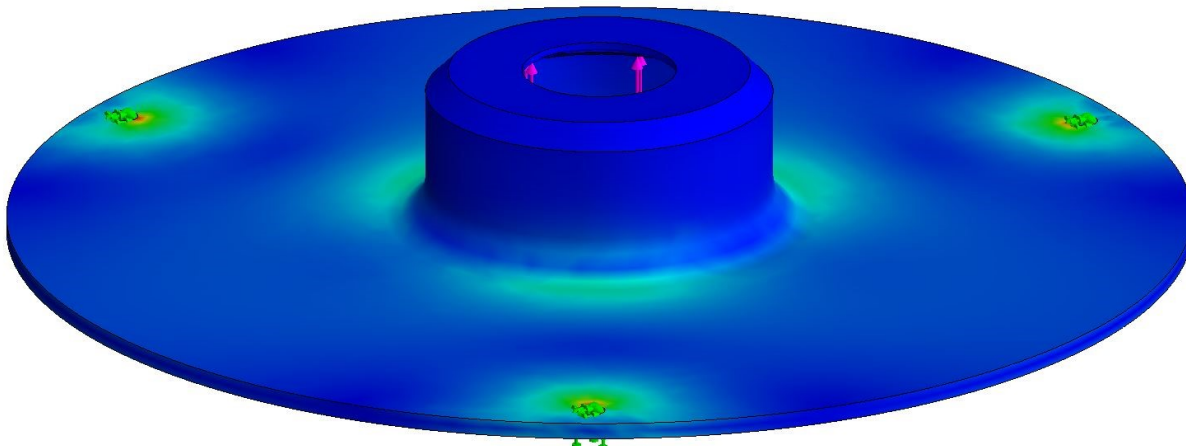
8.5.1 Výsledek statické analýzy



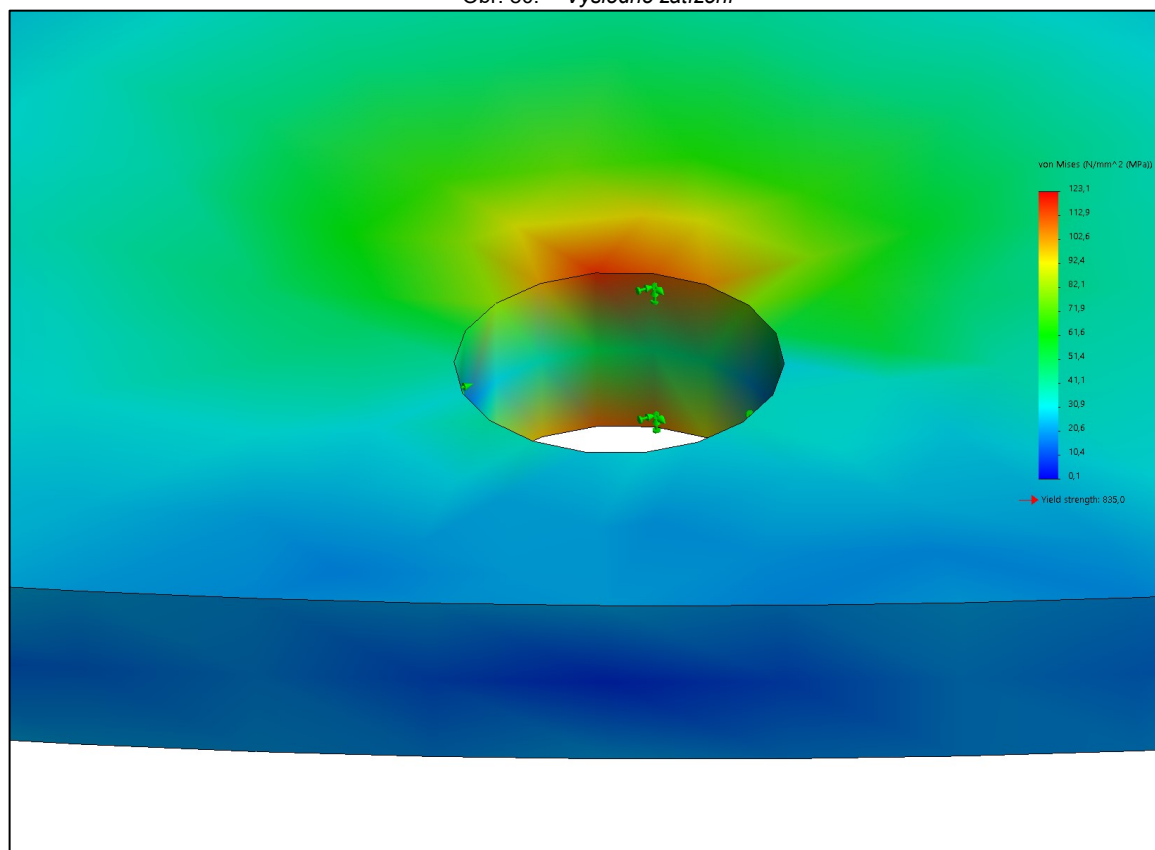
Obr. 78: Výsledné stupnice deformace a zatížení víka



Obr. 79: Výsledná deformace



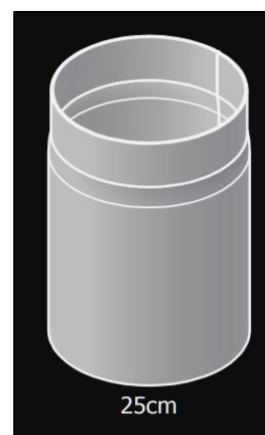
Obr. 80: Výsledné zatížení



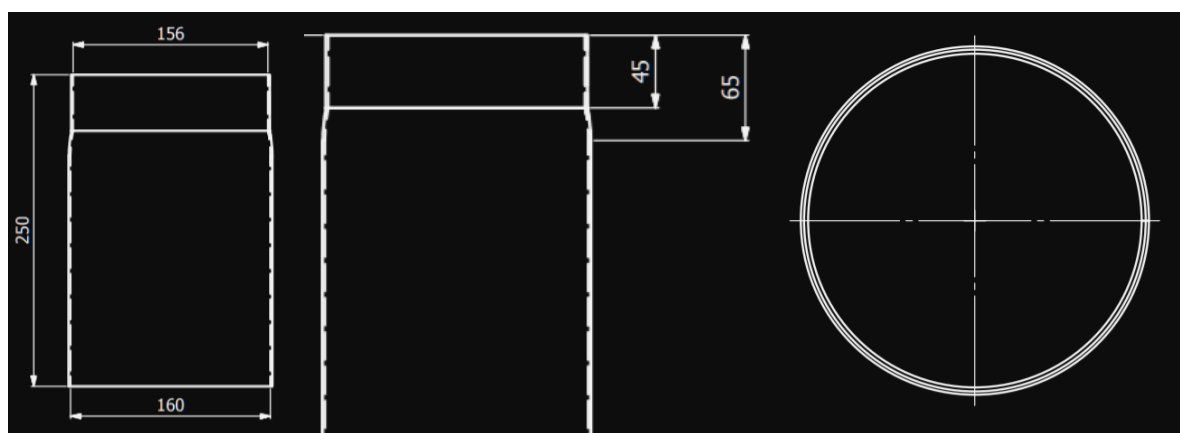
Obr. 81: Výsledné zatížení u díry pro závitovou tyč M4

8.6 Návrh válcové nádoby [31]

První návrh měl moc tlusté stěny, které tvořili návrh příliš těžkým. V dalším návrhu jsem uvažoval použití hliníkové trubky pro odlehčení zařízení. Nakonec jsem boční stěnu válcové nádoby ztenčil návrhem trubky ze silnostěnného kouřovodu, ukázaného na obrázku 82. Trubka kouřovodu 160mm/250mm/1,5mm je určena k odvodu spalin z krbové vložky, krbových kamen a jiných podobných spotřebičů na tuhá paliva. Je vyrobena z oceli podle normy EN 1856-2 a to vč. typu použitého materiálu. Lakování kouřovodů je prováděno senotherním lakem v černém provedení. Z tohoto důvodu jsem 3D model boční válcové nádoby svého zařízení obarvil na černo. Barvu trubky tak považuji za element určující vzhledový styl zařízení. Z této trubky se odřeže spodní část o délce 140 mm. Bližší informace o tvaru polotovaru jsou na obrázku 83.

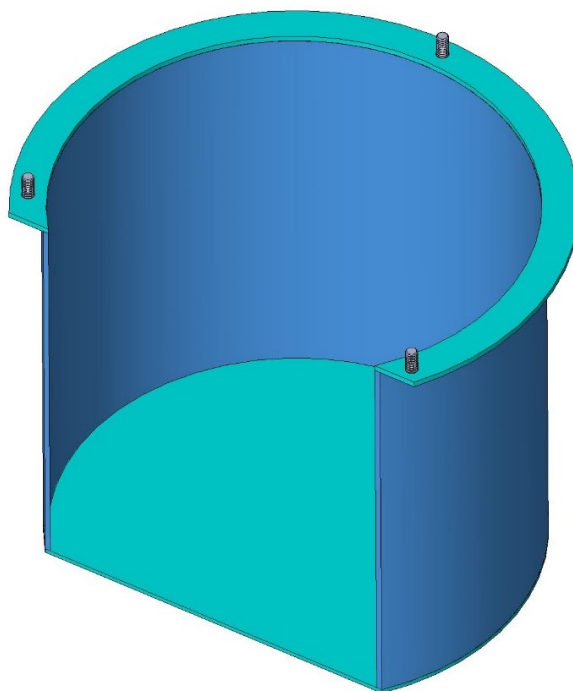


Obr. 82: Trubka [32]



Obr. 83: Zakótovaná vybraná trubka kouřovodu [32]

K trubce získané z kouřovodu se přivaří na jednom konci vyřezaná plechová destička jako dno a na druhém konci přírubový kroužek s přivařenými třemi malými závitovými tyčemi M4 o délce 10mm.

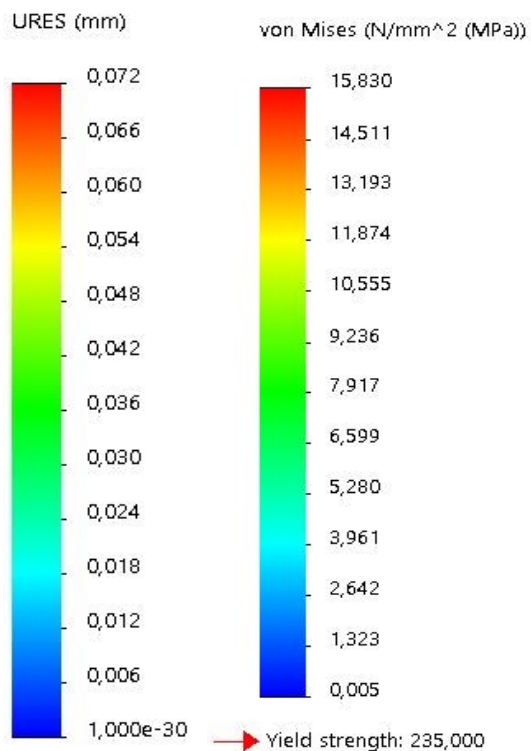


Obr. 84: Svařená válcová nádoba

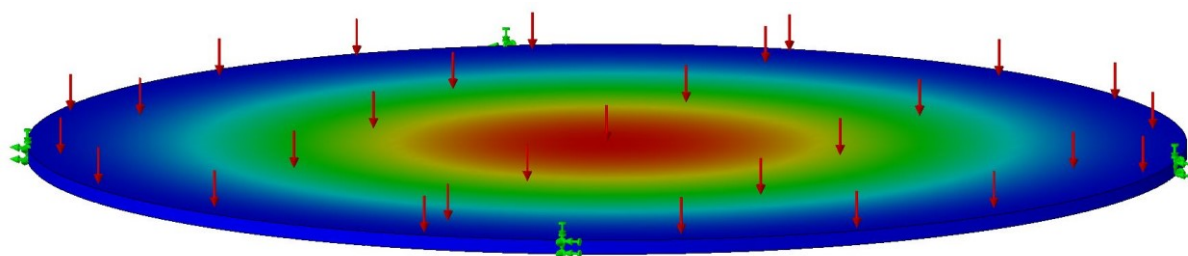
8.6.1 Kontrola dna válcové nádoby

Dno válcové nádoby je přivařené k trubce od kouřovodu o tloušťce 1,5 mm. Dno oproti boční stěně je vystaveno normálové síle od stlačení materiálu víkem zařízení. Ke kontrole jsem použil MKP metodu, přičemž jsem ke kontrole použil stejné zatížení, jako jsem při kontrole vzorku a to 15 700 Pa. Pevnou vazbu jsem vložil na boční stěnu plechu a nechal jsem program vytvořit středně hustou síť.

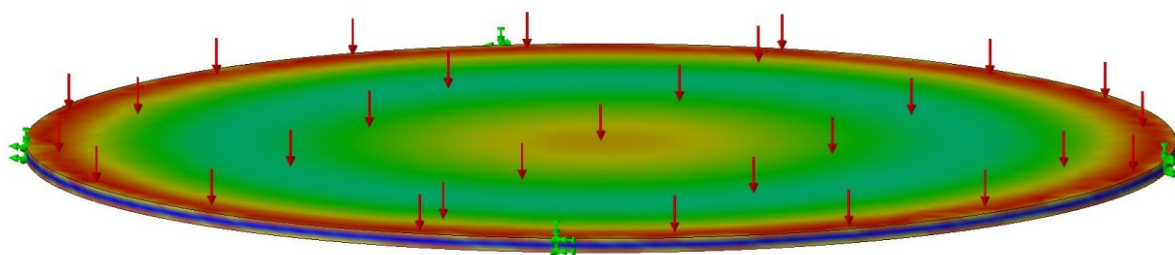
8.6.2 Výsledek statické analýzy



Obr. 85: Výsledné stupnice deformace a zatížení dna nádoby



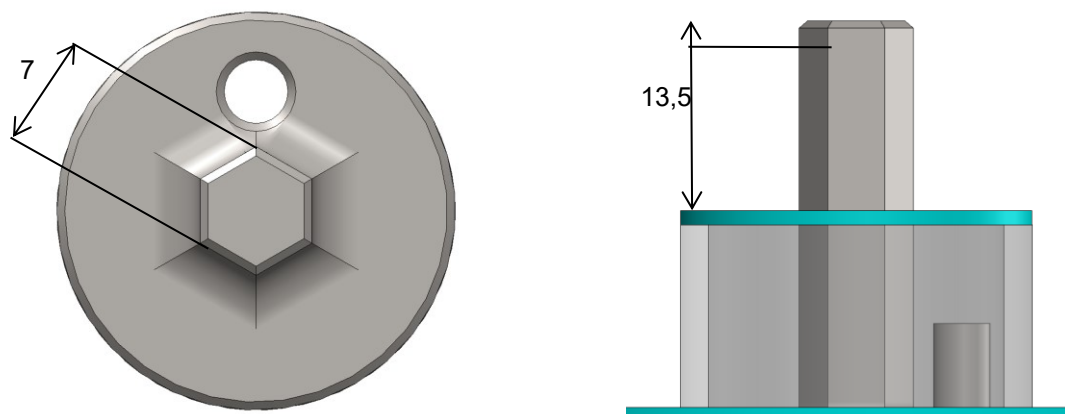
Obr. 86: Výsledná deformace



Obr. 87: Výsledné zatížení

8.7 Návrh uchycení pro aku vrtačku

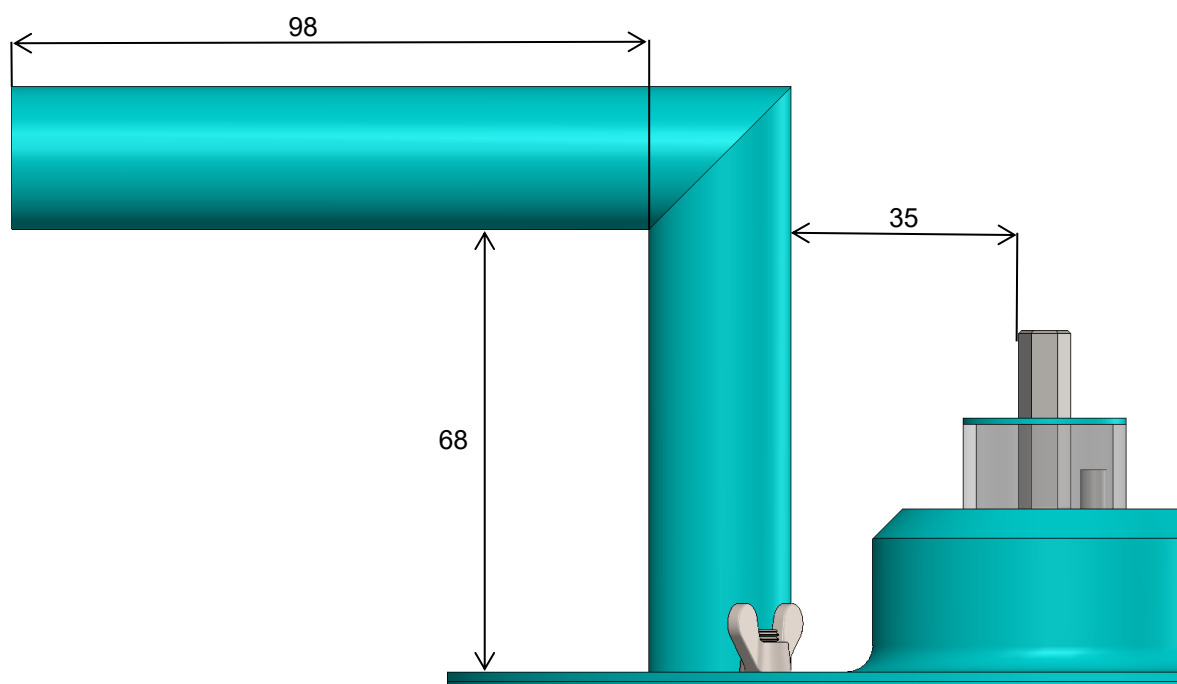
Zhlédnutím pár internetových obchodů s aku vrtačkami jsem vypočetl, že aku vrtačky mají sklíčidlo s možností otevření do 10 mm. Proto jsem navrhl šestihran se šířkou 7 mm.



Obr. 88: Šestihran na hřídeli

8.8 Návrh rukojeti

Rukojeť jsem navrhl co možná nejjednodušeji. Spojením dvou trubek o průměru 22 mm a tloušťce stěny 1 mm. Obě trubky mají jeden konec uřezany pod 45° úhlem pro svaření k sobě. Celá rukojeť se pak přivaří k víku zařízení. Rukojeť jsem navrhl tak, aby se na ní vešla celá dlaň a aby nebyla ani příliš nízká.



Obr. 89: Návrhnutá rukojeť

8.9 Měření kompresivity

Cílenou možnost měření kompresivity jsem do zařízení nezakomponoval. Avšak válcová nádoba by se dala použít jako nádoba o známém objemu. Jak je z rešerše známo zatížením materiálu o známe hodnotě lze měřit procentuální rozdíl změny. Válcová nádoba by se mohla naplnit materiálem a ten by se za použití zatížené destičky o průměru 159 mm stlačoval. Výsledná změna C vyjádřená v % vyjadřuje kompresivitu. Nicméně toto jde dělat i v klasické kbelíku. V tomto ohledu pro praktické účely na to není mé zařízení potřeba.

9 Technická dokumentace

9.1 Právní povinnosti

Samotný návrh i použití zařízení se řídí zákonem č. 22/1997 Sb. - zákon o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů. Dle níže zmíněné definice strojního zařízení mi přišlo, že by se návrh a uvedení na trh mělo řídit nařízením vlády č. 176/2008 Sb. - Nařízení vlády o technických požadavcích na strojní zařízení, které vychází z evropské směrnice 2006/42/EU o strojních zařízeních a o změně směrnice 95/16/ES (přepracované znění). První definice strojního zařízení podle tohoto nařízení zní: Soubor, který je vybaven nebo má být vybaven poháněcím systémem, který nepoužívá přímo vynaloženou lidskou nebo zvířecí sílu, sestavený z částí nebo součástí, z nichž alespoň jedna je pohyblivá, vzájemně spojených za účelem stanoveného použití.

Přistupoval jsem k tomu tedy tak, že pro návrh zařízení je nezbytné postupovat podle tohoto nařízení. To znamená, že je nezbytné provést posouzení shody, které jsem sice kompletně neposoudil, ale při návrhu jsem cílil na její posouzení. Částečně jsem zhodnotil nejzásadnější rizika a zároveň je i snížil na přijatelnou hodnotu podle normy ČSN EN ISO 12 100 - Bezpečnost strojních zařízení - Všeobecné zásady pro konstrukci - Posouzení rizika a snižování rizika. Na přetrvávající rizika jsem upozornil bezpečnostními varováními, které budou uvedeny v návodu k použití dle normy ČSN EN 62079 - Zhotovování návodů - Strukturování, obsah a prezentace.

V poslední řadě musí být po nezbytném splnění dokumentační fáze vystaveno prohlášení o shodě a štítek zařízení s CE značkou jako známka strojního zařízení, které prošlo posouzením shody a může tak být uvedeno do provozu (na trh).

Podle přílohy č. 1 k nařízení vlády č. 176/2008 Sb. ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA OCHRANU ZDRAVÍ A BEZPEČNOSTI VZTAHUJÍCÍ SE NA NÁVRH A KONSTRUKCI STROJNÍCH ZAŘÍZENÍ, jsem se soustředil na tyto prvky:

- V konstrukční fázi jsem zakryl všechny rotující části.
- Uvedl jsem potřebu vytvoření posouzení rizik a návodu k použití.
- Určil jsem místo držení při testování a manipulaci. Zařízení by tak mělo obsluhu lépe vyhovovat a být i celkově o něco bezpečnější.
- Na přetrvávající rizika jsem navrhl upozornit na víku zvolenými bezpečnostními nálepkami.
- Poukázal jsem na riziko z kontaktu se zdravím škodlivými látkami.

9.2 Bezpečnostní nálepky

Tyto bezpečnostní nálepky by se měli vyskytovat na víku zařízení.



Obr. 90: Seznam bezpečnostních nálepek

9.3 Návod k použití

K tomuto zařízení musí být vypracován návod k použití

9.4 Štítek zařízení s CE označením

Na zařízení se musí připevnit štítek zařízení s označením CE, aby bylo právně dovoleno toto zařízení používat na území EU. K tomu musí být také vydáno prohlášení o shodě, jako důkaz splnění podmínek posouzení shody.

9.5 Analýza rizik



NEBEZPEČÍ

Nebezpečí z rotujících dílů

Vážná poranění pořezáním.

- Pohánějte zařízení, vždy kompletně složené dle návodu k použití.
1. Zařízení musí být při provozu pevně uzavřeno.



VAROVÁNÍ

Nebezpečí poranění rukou

Poranění horních končetin.

- Zacházejte se zařízením obezřetně dle návodu k použití.
1. Při práci se vzorkem hrozí riziko stlačení prstů silou od pružiny.
 2. Při zavírání víka hrozí stlačení prstů.



VAROVÁNÍ

Nebezpečí namotání

Namotání prstů a vlasů.

- Pohánějte zařízení, vždy kompletně složené dle návodu k použití.
1. Zařízení musí být při provozu pevně uzavřeno.



VAROVÁNÍ

Nebezpečí pohmoždění

Pohmoždění samotným zařízením.

- Pohánějte zařízení vždy kompletně složené dle návodu k použití.
1. Zařízení musí být při provozu drženo za rukojeť.
 2. Stabilita zařízení závisí pouze na obsluze.



VAROVÁNÍ

Nebezpečí zdraví škodlivé látky

Zařízení je určeno k práci s materiály, které mohou obsahovat zdraví škodlivými látky.

- Naplňujte, vyprazdňujte a pohánějte zařízení vždy dle návodu k použití.
1. Zařízení musí být při provozu pevně uzavřeno.

10 Návrh testování

Tato kapitola slouží jako ukázka z části návodu k použití.

10.1 Podmínky použití zařízení

- Válcová nádoba je uvnitř vyčištěná od abrazivních částic, nebo jiných materiálů, které mohou znehodnotit zkoušku.
- Na každou zkoušku je použitý nový vzorek.
- Zařízení je určeno k testování sypkých materiálů o zrnitosti, která nebrání provedení zkoušky, např. velikostí.
- Hmotnost vzorku se měřit před a po zkoušce.

10.2 Kód vzorku

Zakázka – hmotnost vzorku před testem – hmotnost vzorku po testu – testovaný materiál – zátěž [stupeň zátěže] – otáčky [ot/min] – doba testování [min] – jméno

10.3 Postup zkoušky

K provedení zkoušky postupujte podle návodu k použití:

1. Vizuálně zaznamenejte testovaný vzorek sypkého materiálu.
2. Zkontrolujte čistotu pracovních ploch zařízení, případně je vyčistěte.
3. Shromážděte údaje nutné k vyplnění kódového označení.
4. Nový vzorek označte kódem ze strany, která nebude vystavena opotřebení.
5. Uložte vzorek na hřídel s opěrnou destičkou a zajistěte ho upínacím kroužkem.
6. Naplňte válcovou nádobu materiálem.
7. Zatlačte materiál víkem, aby stupnice zatížení ukazovala zamýšlenou zátěž.
 - Pokud stupnice zatížení ukazuje vyšší než zamýšlené zatížení, odeberte část materiálu a opakujte krok 7.
 - Pokud stupnice zatížení ukazuje nižší než zamýšlené zatížení, přidejte část materiálu a opakujte krok 7.
8. Zajistěte víko všemi křídélkovými maticemi.
9. Nasaďte šestihran hřídele do sklíčidla aku vrtačky.
10. Spustěte časovač.
11. Druhou rukou uchopte pevně rukojeť.
12. Proved'te zkoušku
13. Po dokončení zkoušky vypněte časovač.
14. Demontujte vzorek
15. Očistěte vzorek
16. Zaznamenejte čas a hmotnost po testu.
17. Proved'te vizuální záznam obou stran vzorku.

10.4 Vyhodnocení zkoušky

Vyhodnocení se bude provádět na váze s přesností na 0,1 až 0,01g. Další možností je teoreticky možné vytvořit aplikaci na mobilní telefon, která by vizuálně zhodnotila stupeň abraze. Tato úvaha pochází od vedoucího vývojového oddělení a zajisté bude velice komplikovaná.

11 Ekonomický vliv projektu

Potenciál projektu dle vedoucího vývojového oddělení Schenck Process s.r.o.:

- Sběr materiálových dat.
- Sledování reálného opotřebení komponent.
- Korelace dat z měření materiálových vlastností a reálného opotřebení.
- Výsledkem analýzy je správný návrh zařízení z ekonomického hlediska.
- Lepší ceny = lepší konkurenceschopnost = větší prodejnost.
- **Odhadovaný přínos, pokud bude vše dotažené, si vedoucí vývojového oddělení myslí, že přinese zvýšení prodejnosti o 5%.**

12 Závěr

V diplomové práci jsem navrhl zařízení, pomocí kterého bude možné tvořit databázi abrazivity různých otestovaných materiálů. Návrh zařízení nevychází z existujícího řešení dostupného na trhu. Vycházel jsem tedy z principů fyzikálních principů abrazivity. Při návrhu řešení jsem se držel zadání zadané firmou Schenck Process s.r.o. se sídlem v Praze, která se zabývá návrhem zařízení pro dopravu a zpracování sypaných alternativních paliv převážně pro cementárenský průmysl. Navržené zařízení splňuje požadavek firmy: být přenosné. Navržená hmotnost zařízení je 2,7 kg. Rozměry jsou 236,5xØ184 mm, s rukojetí je šířka 251 mm. Navržené zařízení jsem pojmenoval „Faba“

Zařízení jsem navrhl podle konceptu, který jsem vymyslel po otestování tří vytisknutých konceptů, které mi pomohly k nalezení finálního konceptu. Tyto tři vytisknuté koncepty jsem testoval se vzorky materiálů z provozu. Konkrétně jedním typem RDF, odpadními vodárenskými kaly a jako referenční vzorek jsem použil písek z dětského pískoviště. Z výsledků jsme se s vedoucím vývojového oddělení firmy Schenck Process shodli na dalším směru vývoje, a to zjišťování opotřebení pomocí posuvného vzorku. V průběhu vývoje prototypu jsem došel k názoru, že bude z pohledu bezpečnosti, efektivity i prostoru výhodnější převést posuvný pohyb na rotační. Vývoj prototypu jsem tedy směřoval k navržení zařízení s rotujícím vzorkem. Z důvodu co nejnížší hmotnosti a kompaktnosti zařízení jsem jako pohon zvolil aku vrtačku. Proto jsem na hřídeli navrhl šestihran k uchycení do sklíčidla.

Chtěl jsem navrhnout zařízení schopné kontaktu připomínající reálné zatížení sloupcem materiálu, který se může nacházet např. v násypkách dopravních zařízení apod. Jako maximální uvažované zatížení jsem zvolil tlak od sloupce materiálu 4 m na ploše 1 m² a o hustotě 400kg/m³. Tento návrh má napodobit maximální možné zatížení vytvořené materiálem v násypkách na funkční plochy násypky. Počítal jsem tedy s max. zatížením na vzorek 15 700 Pa. Takové zatížení se v zařízeních zadávající firmy skoro nevyskytují. Nicméně navržené zařízení je teoreticky schopné napodobit tyto krajní zátěžové podmínky.

K napodobení těchto navržených podmínek jsem se rozhodl použít stlačení pružiny. Zatížení převedené na plochu vzorku vytváří sílu působící na pružinu 300N (30,5 kg). Při vložení testovaného materiálu do zařízení musí obsluha stlačit materiál ručně víkem. Ručním stlačením osobní váhy jsem si ověřil, že tato část funkce zařízení není pro muže překážkou. Z výpočtu pracovních délek pružiny jsem vytvořil stupnici zatížení, která svým vysouváním má obsluze ukázat, jestli na vložený obsah materiálu působí 10, 20 nebo 30 kg. V kontrolním výpočtu v programu MitCalc mi bezpečnost pružiny vyšla 0,869. Výrobce pružiny, ale uvádí maximální zatížení pružiny na 317,7 N, a jelikož jsem potřeboval zvolit co nejmenší pružinu, abych nemusel zvětšovat průměr hřídele, tak jsem tuto pružinu do svého návrhu použil. Z tohoto důvodu mi vyšlo předdimenzované ložisko s vnitřním průměrem 25 mm. Na podmět vedoucího vývojového oddělení jsem použil dvouřadé ložisko s kosoúhlým stykem, aby hřídel byla definována jakoby ve dvou místech.

Materiál vzorku jsem zvolil hliník, jako snadnější opotřebitelný a standardně dodávaný prvek. Nicméně jeho vhodnost se teprve ukáže až po výrobě a otestování prototypu. Z ergonomického hlediska jsem do zařízení přidal rukojeť. Ta slouží k zajištění zařízení při testování tak pro nošení samotného zařízení.

V předposlední kapitole jsem uvedl informace týkající se nezbytné technické dokumentace, která je vyžadovaná nařízením vlády č. 176/2008 Sb. V poslední kapitole jsem uvedl ekonomický vliv projektu podle vedoucího vývojového oddělení.

Části 3D sestavy jako dno válcové nádoby, ložiskový domek a zatížený vzorek s opěrnou destičkou, byly ověřeny MKP analýzou. Nezbytné polotovary k výrobě jsem uvedl v sestavném výkresu. Polotovary jsem volil pouze z nabídek na českém trhu. Výsledkem práce v CAD programu je kompletní výkresová dokumentace, kterou jsem uložil do přílohy č.1.

13 Literatura

- [1] BC. JANOUŠEK, Milan. *Zařízení pro testování abrazivního opotřebení*. Praha, 2015, 8 s. Dostupné také z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf15/5519.pdf>. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní Ústav konstruování a částí strojů. Vedoucí práce Ing. Pavel Malý.
- [2] HAS CZ a.s. [online]. Příbylova 28, CZ -719 00 Ostrava - Kunčice: HAS CZ, c2020 [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: <http://has.cz/>
- [3] HURYCHOVÁ, Hana. Studium statických a dynamických sybných vlastností farmaceutických excipientů: Study of static and dynamic flow properties of pharmaceutical excipients. Hradec Králové, 2018, 152 s. Dostupné také z: <https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/99214/140065540.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Disertační práce. Univerzita Karlova, Farmaceutická fakulta v Hradci Králové, Katedra farmaceutické technologie. Vedoucí práce Šklubalová, Zdeňka.
- [4] DOC. ING. SLÍVA, Aleš, Ph.D. ZÁKLADY ZAŘÍZENÍ ÚPRAVEN: Studijní materiály pro studijní obor Dopravní a manipulační technika Fakulty strojní a obory Hornicko-geologické fakulty. Ostrava, 2011, 91 s. ISBN 978-80-248-2732-2. Dostupné také z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2732-2.pdf>. Učební text předmětu „Zařízení úpraven“. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní.
- [5] Inženýrství farmaceutických výrob. VŠCHT [online]. 2016 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: http://tresen.vscht.cz/kot/wp-content/uploads/2010/01/Sypk%C3%A9-l%C3%A1tky_podklady-3x1c-2016.pdf
- [6] Powder/Bulk Solids: What Is Compressibility? [online]. Santa Monica, USA: Powder/Bulk Solids, 2015 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.powderbulksolids.com/article/Compressibility%3A-Just-What-Is-It%3F-11-13-2015>
- [7] Bulk Properties. Freemantech.co.uk [online]. Tewkesbury, Velká Británie: Freeman Technology, c2014-2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.freemantech.co.uk/powder-testing/ft4-powder-rheometer-powder-flow-tester/bulk-properties>
- [8] BC. SLANINA, Ondřej. *Sypné vlastnosti jemných partikulárních materiálů jako funkce vybraných látkových parametrů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014, 155 s. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=81510. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Doc. Ing. Tomáš Svěrák, CSc.
- [9] BC. JANOUŠEK, Milan. *Zařízení pro testování abrazivního opotřebení*. Praha, 2015, 8 s. Dostupné také z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf15/5519.pdf>. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní Ústav konstruování a částí strojů. Vedoucí práce Ing. Pavel Malý.
- [10] *Abrasion & Wear Testing* [online]. Worldwide: Element Materials Technology, c2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.element.com/materials-testing-services/abrasion-and-wear-testing>
- [11] KAŠPAROVÁ, Michaela, František ZAHÁLKA a Šárka HOUDKOVÁ. Hodnocení abrazivní a adhezivní odolnosti materiálů: Evaluation of the abrasive and of the adhesive materials resistance. In: *Metal 2009 : sborník Konference Metal 2009, 19. - 21.5.2009*. Ostrava: Tanger,

- 2009, s. 1-7. ISBN 9788087294031. Dostupné také z: http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal_09/Lists/Papers/054.pdf
- [12] *Helping Our World Work Better: Our Mission* [online]. West Conshohocken, USA: ASTM INTERNATIONAL, c1996-2020 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: <https://www.element.com/materials-testing-services/abrasion-and-wear-testing>
- [13] *DRY SAND/ RUBBER WHEEL APPARATUS* [online]. Sugar Grove, USA: Falex Corporation, 2015 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: http://www.bluesphere.be/images/sites/114/editor/files/FalexDrySand_2015.pdf
- [14] Figure 1. Dry sand/rubber wheel abrasive test rig.: Multiple Response Optimization of Three-Body Abrasive Wear Behaviour of Graphite Filled Carbon-Epoxy Composites Using Grey-Based Taguchi Approach. In: *ResearchGate: Discover scientific knowledge and stay connected to the world of science* [online]. India: The National Institute of Engineering, 2012, 2012, 2012 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Dry-sand-rubber-wheel-abrasive-test-rig_fig1_316539535
- [15] *Testing Capabilities of Kondex's Metallurgy Lab* [online]. Lomira, USA: Kondex Corporation U.S.A., c2020 [cit. 2019-08-11]. Dostupné z: https://www.kondex.com/at_your_service.html
- [16] ČERNÝ, Libor. *Opatřebení tvrdých povlaků*. Brno, 2016, 47 s. Dostupné také z: <http://www.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/1133/Cerny.pdf/>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Milan Omasta, Ph.D.
- [17] *Taber Abraser - testování odolnosti proti otěru a omyvatelnost* [online]. Ostrava: Proinex Instruments, c2017 [cit. 2020-01-2]. Dostupné z: <https://www.proinex.cz/cs/52-taber-abraser-testovani-odolnosti-proti-oteru-a-omyvatelnost.html>
- [18] Fig. 9.16: Evolution of weight loss during Taber Wear test on electroless nickel-boron coating on aluminium with and without heat treatment.: 9.6 Tribological properties of the heat treated coatings. In: VITRY, Véronique. *Electroless nickel-boron deposits: Synthesis, formation and characterization; Effect of heat treatments; Analytical modeling of the structural state*. [online]. Belgium, 2009 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/274083317_Electroless_Nickel-Boron_deposits_Synthesis_formation_and_characterization_Effect_of_heat_treatments_Analytical_modeling_of_the_structural_state
- [19] ASTM G75-07(2013): Standard Test Method For Determination Of Slurry Abrasivity (Miller Number) And Slurry Abrasion Response Of Materials (SAR Number). *Webstore.ansi.org* [online]. Spojené státy americké: American National Standards Institute (ANSI), 2020 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmg75072013?gclid=EAlaIqobChMI5PBtOHP4AIVaSJtCh1YsgkKEAAYASAAEgl-H_D_BwE
- [20] ČERNÝ, Libor. *Opatřebení tvrdých povlaků*. Brno, 2016, 47 s. Dostupné také z: <http://www.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/1133/Cerny.pdf/>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Milan Omasta, Ph.D.
- [21] Fig. 4. Miller test apparatus: A study on the discharge pipes wear of slurry shield TBM in rock strata. In: *ResearchGate: Discover scientific knowledge and stay connected to the world of science* [online]. Jižní Korea: Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 2020, 2017 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/figure/wa-gat-i-Miller-Testui-gyeong-u-jisogjeog-in-seulleoliui->

- mamolo-inhan-sonsillyang-eul-sanjeonghaneun-siheom-eulo-200-mm-siheom-chemetal-blockga-bundang-48hoe-wangbog_fig10_318422974
- [22] Štěpka. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2020 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0t%C4%9Bpka>
- [23] Peleta. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2019 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Peleta>
- [24] Pelety. In: *Vytapeni.tzb-info.cz* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/docu/clanky/0190/019014o3.jpg>
- [25] ŠEBEK, Dušan. H...O opravdu hoří: H...O hoří? Hoří Vážení Klecaňáci, hoří... *Klecany.cz: Oficiální informační portál občanů města Klecany* [online]. Klecany: Target Media [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.klecany.cz/obsah/h-o-opravdu-hori-594.html>
- [26] VONDRÁČEK, P. a M. SCHATZ. *Zkoušení polymerů*. Praha, 1978. Skripta, s 134-143. VŠCHT, Fakulta chemické technologie.
- [27] Žiletka. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2020 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDiletka>
- [28] *Ultimaker 3 3D Printer Fully Assembled* [online]. Valencia Cir Lake Forest, USA: MatterHackers, 2020 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/store/printer-kits/Ultimaker-3-d-printer>
- [29] *SODEMANN-Pružiny* [online]. SODEMANN-pružiny.cz, 2020 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.sodemann-pruziny.cz/12610>
- [30] EN AW-1050 0 (Al99,5 W7), EN AW – 1050A H14/H24 (Al99,5 F11/G11). *ALUNET - Hliníkové profily na míru* [online]. Pardubice: ALUNET.cz, 2020 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-1050>
- [31] Trubka 160mm/25cm/1,5mm: Trubky. *Krbylevně.cz* [online]. Broumov: Ekoflam, 2020 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.krbylevne.cz/p/trubka-160mm-25cm-1-5mm#>
- [32] *Nabídka trubek: Krbylevne.cz* [online]. Broumov: Ekoflam, 2020 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://krbylevne-cz.static.s1.updates.com/k/k5d6a6bcc8109a.pdf>

14 Seznam příloh

Příloha č. 1: Kompletní výkresová dokumentace v PDF.

Příloha č. 2: Výsledky nevyhovujících MKP analýz vzorku s opěrnou destičkou.